

На правах рукописи



**Александров Иван Викторович**

**СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С АКТИВНЫМ СИЛОВЫМ  
ФИЛЬТРОМ ПРИ ПОФАЗНОМ УПРАВЛЕНИИ ТОКАМИ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель:

**Нос Олег Викторович**

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра проектирования технологических машин, профессор кафедры.

Официальные оппоненты:

**Шклярский Ярослав Элиевич**

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра общей электротехники, заведующий кафедрой.

**Демидова Галина Львовна**

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

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (г. Томск).

Защита диссертации состоится «20» декабря 2023 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Одним из наиболее перспективных путей развития современного энергокомплекса, в том числе и в Российской Федерации, является более широкого использования в составе сетей общего назначения объектов распределенной и децентрализованной энергетики, а также применение данных технологии генерации при построении систем электроснабжения (СЭС) автономных потребителей. Принято считать, что применение СЭС указанного выше типа позволит увеличить долю возобновляемых источников энергии при ее производстве, снижая, таким образом, потребление ископаемого топлива. В то же время распределенные/децентрализованные СЭС, в силу особенностей построения и функционирования, накладывают ряд ограничений на параметры генераторов и нагрузок в их составе, обусловленных требованиями устойчивости и эффективности их работы.

Выполнение данных требований достигается внедрением полупроводниковых преобразователей электрической энергии в состав такого типа систем электроснабжения, среди которых важную роль играют силовые фильтры гармоник, в том числе активные (АСФ), осуществляющие компенсацию неактивных компонент мощности (НКМ) нелинейных нагрузок и другие вспомогательные функции. Вышесказанное указывает на то, что улучшение качественных показателей функционирования СЭС распределенного/децентрализованного типа, реализуемого за счет повышения эффективности процесса и устройства компенсации НКМ, является актуальной научно-прикладной задачей.

**Степень разработанности.** В связи с тем, что современные силовые транзисторные модули на основе SiC-МОП и Si-БТИЗ технологий позволяют подключать двухуровневый инвертор напряжения с LC-фильтром к питающей сети с напряжением 0,23/0,4 кВ напрямую без использования силового понижающего трансформатора, обеспечить высокую частоту коммутации и низкий уровень потерь, наиболее актуальным в данной области является направление разработки и оптимизации алгоритмов управления АСФ, включая уменьшение числа аппаратных блоков, необходимых для реализации данных алгоритмов. Большой вклад в развитие алгоритмов управления АСФ внесли: Г. С. Зиновьев, Н. И. Щуров, А. А. Ефимов, Ю. К. Розанов, Г. М. Мустафа, Н. Л. Новиков, Г. Г. Жемеров, Н. Akagi, A. Nabae, H. Kim, F. Z. Peng, J.-S. Lai, J.-C. Montaño, P. Salmerón, R. S. Herrera, A. Ferrero, L. Cristaldi, V. Soares, L. S. Czarnecki, S. M. Fazeli и др.

Повышение эффективности процесса компенсации и управления НКМ в четырехпроводных СЭС, в том числе распределенных, можно добиться с помощью применения пофазной компенсации компонент неактивной мощности. На данный момент наиболее проработанными в данном направлении являются работы С. К. Поднебенной, С. В. Кузьмина, В. П. Довгун, С. А. Темербаева, Н. П. Боярской, L. S. Czarnecki, S. M. Fazeli.

На основе работ L. S. Czarnecki, S. M. Fazeli сформулированы принципы пофазной компенсации НКМ с использованием только АСФ при управлении в  $a$ - $b$ - $c$  координатном базисе. Однако, алгоритм управления, построенный в соответствии с теорией физических компонент тока L.S. Czarnecki, является требовательным к

микропроцессорной части системы управления АСФ, так как реализуется в частотной области и требует сложных математических вычислений для оценки компонент тока нагрузки, подпадающих под компенсацию, что ограничивает производительность алгоритма управления и снижает качество компенсации. В случае алгоритма, представленного S. M. Fazeli, основанного на применении режекторной фильтрации, использование большого количества блоков режекторных фильтров, в том числе аналоговых, усложняет программно-аппаратную реализацию системы автоматического управления (САУ) АСФ, а также затрудняет процесс подстройки параметров режекторного фильтра под изменяющиеся параметры напряжения питающего источника. К тому же, цель данного алгоритма компенсации не стоит в полном исключении реактивной мощности, потребляемой нагрузкой, что не позволяет гарантировать коэффициент мощности близкий к единичному значению в процессе функционирования АСФ на основе системы управления с таким алгоритмом.

В работе также рассмотрены режимы работы АСФ в составе СЭС, включающие возможность электропитания нагрузок постоянного тока, путем подключения их к звену постоянного тока (ЗПТ) АСФ, что расширяет ее функциональные возможности. Для обеспечения устойчивости всей системы электроснабжения в таком случае требуется выполнение импедансного критерия устойчивости, накладывающего ограничения на динамические свойства СЭС, большой вклад в учет которых при анализе и синтезе систем управления СЭС на базе электронных преобразователей внесли В. Ф. Дмитриков, S. Hiti, F. Vlaabjerg и др.

Учитывая вышесказанное, были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Цель диссертационного исследования** заключается в повышении эффективности процесса компенсации неактивных компонент мощности в СЭС децентрализованного типа и реализующих их устройств за счет упрощения программно-аппаратной части системы управления активного силового фильтра с возможностью электропитания нагрузок постоянного тока.

Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие **задачи**:

- произвести литературный обзор режимов работы систем электроснабжения с активными силовыми фильтрами и выявить основные функции, которые выполняет АСФ в системах электроснабжения распределенного типа;
- разработать математическую модель АСФ, как основного регулируемого компонента СЭС с учетом возможности по электропитанию нагрузок, подключаемых к звену постоянного тока АСФ;
- исследовать зависимость выходного импеданса в звене постоянного тока СЭС распределенного типа от параметров регуляторов системы управления подчиненного типа напряжением звена постоянного тока АСФ при управлении в исходной  $a-b-c$  системе координат;
- выполнить структурно-параметрический синтез системы управления АСФ на заданный максимум и форму ЛАЧХ выходного импеданса СЭС в звене постоянного тока, обеспечивающий ее устойчивую работу с нагрузками постоянного тока;

– разработать алгоритмы управления АСФ, обеспечивающие пофазную покомпонентную компенсацию составляющих неактивной мощности нелинейной нагрузки переменного тока СЭС с упрощенными требованиями к программно-аппаратной части АСФ;

– произвести практическую верификацию предложенных математических выражений и алгоритмов управления АСФ в составе исследуемой СЭС.

**Объектом исследования** является четырёхпроводная система электроснабжения распределенного/децентрализованного типа, позволяющая обеспечить электропитание нагрузок постоянного и переменного тока, с активным силовым фильтром при пофазном управлении токами активного силового фильтра, **предметом исследования** являются динамические характеристики СЭС, а также алгоритмы управления активным силовым фильтром.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. В математической модели активного силового фильтра в частотной области, как основного управляемого компонента исследуемой системы электроснабжения, позволяющей установить количественную связь параметров частотных характеристик активного силового фильтра, с параметрами его силовой схемы при управлении в исходной  $a-b-c$  системе координат.

2. В результатах анализа частотных характеристик активного силового фильтра в составе четырёхпроводной системы электроснабжения и полученных математических выражениях его передаточных функций, как объекта управления в разомкнутом состоянии в исходной  $a-b-c$  системе координат с учетом влияния параметров силового  $LC$ -фильтра.

3. В установленных аналитических выражениях, связывающих параметры АЧХ выходного импеданса в звене постоянного тока системы электроснабжения и параметры регуляторов двухконтурной системы управления активным силовым фильтром в исходном  $a-b-c$  координатном базисе, а также в разработанной методике настройки параметров регуляторов на заданный максимум выходного импеданса системы электроснабжения на стороне постоянного тока.

4. В предложенном алгоритме пофазной компенсации неактивных составляющих полной мощности нагрузки переменного тока системы электроснабжения с упрощенной программно-аппаратной реализацией, а также его модификации, не требующей наличия датчиков переменного напряжения.

**Практическая значимость результатов работы:**

1. На основе математической модели активного силового фильтра получены упрощенные выражения для определения положения нулей и полюсов передаточных функций при управлении в исходной  $a-b-c$  системе координат, которые могут быть реализованы в микропроцессорной системе управления или стать основой инженерной методики расчета параметров регуляторов.

2. Разработан полнофункциональный макет системы электроснабжения на основе активного силового фильтра с пофазным управлением токами, который был использован в процессе практической верификации результатов диссертационной работы и может быть использован для дальнейших исследований.

3. Разработаны программные реализации блоков оценки активной и реактивной мощности нагрузки в отдельной фазе трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения, которые могут быть встроены в программное обеспечение микропроцессорных систем управления АСФ, а также программная реализация системы управления АСФ.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Математическая модель активного силового фильтра, как объекта управления в разомкнутом состоянии, которая позволяет установить положение на оси частот нулей и полюсов его передаточных функций в исходной  $a-b-c$  системе координат с учетом влияния параметров входного  $LC$ -фильтра.

2. Методика структурно-параметрического синтеза двухконтурной системы управления подчиненного типа напряжением звена постоянного тока активного силового фильтра, позволяющая обеспечить желаемый максимум АЧХ выходного импеданса системы электроснабжения в звене постоянного тока.

3. Алгоритм и структура системы управления активным силовым фильтром, позволяющие обеспечить пофазную покомпонентную компенсацию неактивных составляющих полной мощности нагрузки переменного тока системы электроснабжения с упрощенными программно-аппаратными требованиями к активному силовому фильтру.

4. Модификация разработанного алгоритма пофазной покомпонентной компенсации, не требующая установки датчиков переменного напряжения трехфазного источника питания системы электроснабжения.

**Достоверность полученных результатов** достигается выбором математического аппарата, советуемого поставленным задачам, корректностью принимаемых допущений, а также соответствием результатов, получаемых в процессе математического и имитационного моделирования, результатам, полученным в процессе практической верификации.

**Методы исследования:** математические модели АСФ получены с помощью метода осреднения переменных в пространстве состояний, исследование частотных характеристик и алгоритма управления АСФ производилось при помощи полученной математической модели, имитационных моделей в *Matlab/Simulink* с использованием встроенных алгоритмов анализа частотных характеристик, а также при помощи методов и инструментов экспериментального исследования.

**Апробация результатов исследования** производилась в рамках следующих мероприятий:

1. Всероссийские научные конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ – 2019, НТИ – 2020), г. Новосибирск.

2. Международные конференции молодых ученых и специалистов по Микро/Нанотехнологиям EDM (EDM – 2019, EDM – 2021, EDM – 2022), Эрлагол, Республика Алтай.

3. XVI всероссийская научно-практическая конференция «Научная сессия НТИ НИЯУ МИФИ – 2022», г. Новоуральск.

4. XXVI Московский международный салон изобретений и инновационных технологий «Архимед» (2022 г., 2023 г.), г. Москва.

5. Международная выставка инноваций и конкурс научных разработок Hi-Tech – 2022, Hi-Tech – 2023, г. Санкт-Петербург.

6. Научные семинары, приуроченные к международному дню IEEE (IEEE Day 2020, 2021), г. Новосибирск.

7. Научные семинары кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета и научный семинар Института проблем управления российской академии наук (ИПУ РАН), г. Москва.

**Результаты работы опубликованы** в 14 печатных работах, 3 из которых опубликованы в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, 2 патента на полезную модель, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 5 в журналах и трудах конференций, индексируемых в Scopus и WoS, 3 в трудах всероссийских конференций.

**Результаты работы получены и применены** при выполнении НИР и НИОКР в рамках следующих грантов:

Грант ФСИ РФ в целях выполнения НИОКР по теме: «Разработка и испытания опытного образца активного силового фильтра с независимым управлением выходными токами для систем электроснабжения переменного тока с несимметричными нагрузками». Договор № 4720ГС1/78328 от 14.09.2022.

Грант Президента РФ для молодых ученых, проект МК-1676.2020.8 «Разработка адаптивных алгоритмов управления распределенными энергосистемами с открытой архитектурой» 2019-2021 г.

Грант в рамках реализации программы развития НГТУ, научный проект № С21-23 «Разработка и исследование энергоэффективных алгоритмов управления активным силовым фильтром в кватернионном базисе токов сети» от 15.04.2021.

**Личный вклад автора** состоит в непосредственном решении поставленных задач диссертационного исследования, а именно в проведении математического и имитационного моделирования, разработке методики структурно-параметрического синтеза, алгоритмов управления и макетного образца СЭС с практической верификацией результатов. Постановка цели и задач диссертационного исследования осуществлялась автором совместно с научным руководителем Носом О.В.

**Исследования, представленные в диссертационной работе, соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»:**

– П.2: разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов;

– П.3: разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления;

– П.4: исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

**Диссертация состоит из:** введения, основной части, состоящей из пяти глав, заключения, списка литературы, состоящего из 111 наименований, 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 174 страниц, 70 рисунков, 15 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** к диссертационному исследованию обоснована его актуальность, а также описана степень разработанности темы исследования на основе аналитического обзора существующих способов построения алгоритмов управления активными силовыми фильтрами, осуществлена постановка цели и задач диссертационного исследования.

**В первой главе** рассмотрены особенности систем электроснабжения, в структуре которых присутствуют активные силовые фильтры, подключаемые параллельно нагрузке переменного тока СЭС. На основе литературного обзора способов построения таких систем были выявлены основные задачи, которые могут возлагаться на АСФ в таких СЭС, а также критерии энергетической эффективности системы электроснабжения и ее устойчивости.

Наиболее распространенной структурой СЭС с параллельным АСФ является такая структура, в которой к ЗПТ АСФ не подключаются нагрузки постоянного тока. В СЭС данного типа активный силовой фильтр выполняет задачи поддержания нормированного качества электрической энергии в соответствии со следующими показателями, установленными в ГОСТ 30804.3.12-2013 и ГОСТ Р 56124.2–2014

$$\text{СКГС} = K_{\text{Г.Т}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2}, \cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}, \chi = \frac{P}{S} \approx \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + K_{\text{Г.Т}}^2}},$$

где  $I_n$  и  $I_1$  – действующее значение  $n$ -ой и основной гармоники тока, потребляемого от источника питания (ИП),  $P_1$  – активная мощность потребляемая на основной гармонике напряжения питающего источника,  $S_1$  – полная мощность, потребляемая на основной гармонике напряжения питающего источника.

Система электроснабжения, показанная на рисунке 1, отличается от упомянутой выше тем, что АСФ в данном случае выполняет не только задачу поддержания

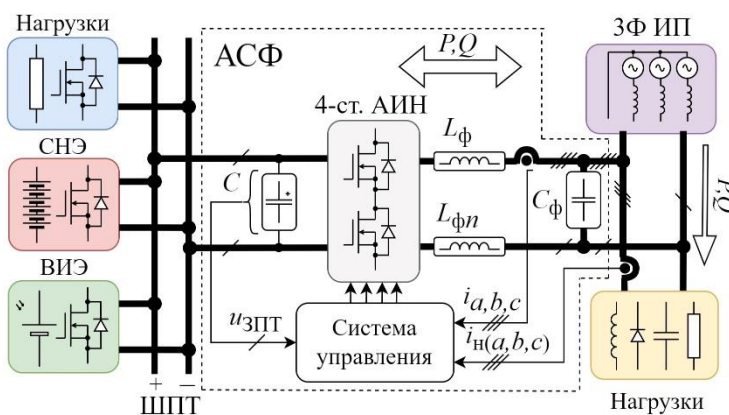


Рисунок 1 – Пример децентрализованной СЭС на основе АСФ

нормированного качества электрической энергии, но и обеспечивает электропитание нагрузок постоянного тока самостоятельно или совместно с дополнительными преобразователями постоянного тока, подключающимися к ЗПТ АСФ (работа в режиме активного выпрямителя напряжения). В таком случае, как известно, при управлении напряжением звена постоянного тока АСФ требуется обеспечение заданной формы и



максимального значения АЧХ выходного импеданса (ВИ) на стороне постоянного тока СЭС, отвечающего критерию устойчивости по следующему соотношению

$$\max(|Z_o(j\omega)|) < U_{3ПТ}^2 / P_H,$$

где  $Z_o(j\omega)$  – передаточная функция (ПФ) выходного импеданса СЭС на стороне постоянного тока, численно равная выходному импедансу АСФ,  $U_{3ПТ}$  – номинальное напряжения ЗПТ,  $P_H$  – максимальная мощность нагрузок постоянного тока СЭС.

Также в результате проведенного аналитического обзора алгоритмов формирования входного тока АСФ выявлено, что наиболее перспективными с точки зрения повышения эффективности процесса компенсации неактивных составляющих полной мощности являются алгоритмы с пофазным управлением входными токами. Наиболее разработанными среди них являются алгоритмы, предложенные L.S. Czarnecki, S.M. Fazeli. Они позволяют обеспечить пофазную покомпонентную компенсацию неактивных составляющих мощности, используя только АСФ без дополнительных силовых преобразователей или пассивных корректоров мощности, что упрощает силовую часть АСФ. Однако, такие алгоритмы являются требовательными к программно-аппаратной части системы управления АСФ, что значительно ограничивает их эффективность и функциональные возможности. В таком случае требуется разработка новых алгоритмов со сниженными требованиями к программно-аппаратной части системы управления АСФ.

Таким образом, в результате представленного в первой главе аналитического обзора была подтверждена актуальность темы исследования и выявлены пути повышения эффективности процесса компенсации компонент неактивной мощности. Определено, что при проектировании алгоритмов управления АСФ, функционирующих в составе СЭС с обеспечением электропитания нагрузок постоянного тока, требуется ограничить выходной импеданс СЭС на стороне постоянного тока путем выбора структуры и параметров регуляторов системы автоматического управления (САУ) АСФ на этапе проектирования алгоритма.

**Во второй главе** диссертационного исследования произведен анализ частотных характеристик (ЧХ) активного силового фильтра, построенного по схеме двухуровневого автономного инвертора напряжения с дополнительной транзисторной стойкой, с учетом влияния силового LC-фильтра на ЧХ АСФ. Функциональная схема исследуемого объекта показана на рисунке 2. На данном рисунке изображена схема СЭС, состоящая из питающего трехфазного (3Ф) источника напряжения с внутренними ЭДС ( $e_{ca}, e_{cb}, e_{cc}$ ), 3Ф нелинейной нагрузки переменного тока ( $j_a, j_b, j_c$ ), двухуровневого инвертора напряжения с емкостным накопителем ( $C$ ), дополнительной транзисторной стойкой и нелинейной нагрузкой постоянного тока в ЗПТ ( $j_n$ ), подключающегося к питающему источнику параллельно нагрузке переменного тока через силовой LC-фильтр ( $L_\phi, C_\phi$ ) и дроссель нулевого проводника ( $L_{\phi n}$ ).

На основе представленной в работе исходной системы дифференциальных уравнений АСФ составлена система дифференциальных уравнений, описывающая его как объект управления при малых отклонениях переменных состояния,

входных и выходных воздействий, и записана в форме Коши. Получены матричные передаточные функции, связывающие малосигнальные отклонения входных воздействий в виде средних значений за период коммутации силовых ключей модулирующих сигналов ШИМ ( $\tilde{d}_{an}, \tilde{d}_{bn}, \tilde{d}_{cn}$ ), тока нагрузки ЗПТ ( $\tilde{j}_H$ ), а также фазных ЭДС ИП ( $\tilde{e}_{ca}, \tilde{e}_{cb}, \tilde{e}_{cc}$ ) и выходных переменных в виде фазных токов дросселей  $L_\phi$  ( $\tilde{i}_{\phi a}, \tilde{i}_{\phi b}, \tilde{i}_{\phi c}$ ) и напряжения ЗПТ ( $\tilde{u}_{ЗПТ}$ ) в частотной области.

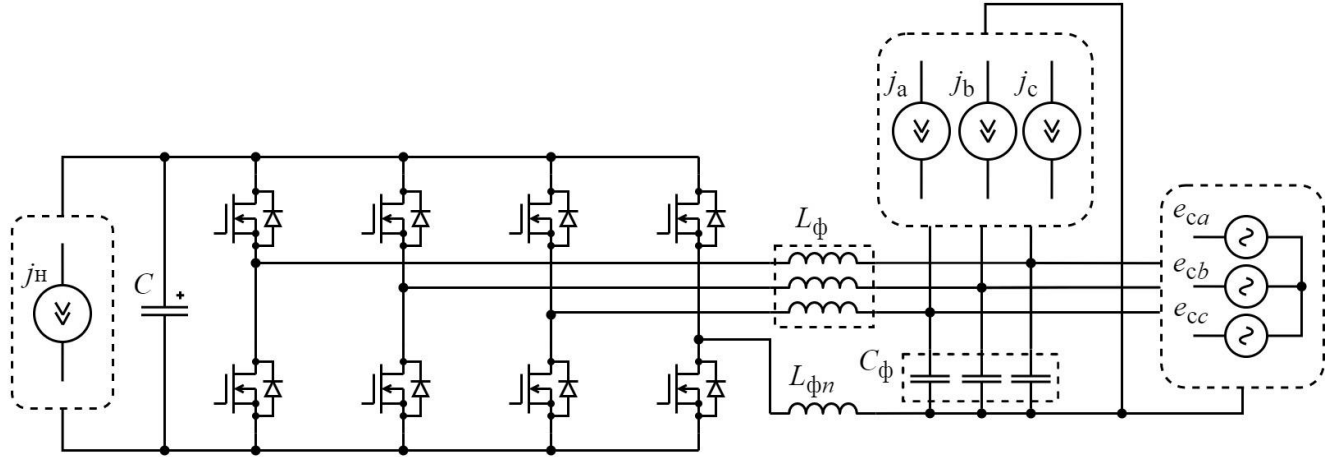


Рисунок 2 – Функциональная схема силовой части исследуемой СЭС

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{\phi(a)}(s) \\ \tilde{i}_{\phi(b)}(s) \\ \tilde{i}_{\phi(c)}(s) \\ \tilde{u}_{ЗПТ}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{i_a/d_{an}}(s, \vartheta_{an}) & W_{i_a/d_{bn}}(s, \vartheta_{bn}) & W_{i_a/d_{cn}}(s, \vartheta_{cn}) & W_{i_a/j_H}(s) \\ W_{i_b/d_{an}}(s, \vartheta_{an}) & W_{i_b/d_{bn}}(s, \vartheta_{bn}) & W_{i_b/d_{cn}}(s, \vartheta_{cn}) & W_{i_b/j_H}(s) \\ W_{i_c/d_{an}}(s, \vartheta_{an}) & W_{i_c/d_{bn}}(s, \vartheta_{bn}) & W_{i_c/d_{cn}}(s, \vartheta_{cn}) & W_{i_c/j_H}(s) \\ W_{u_{ЗПТ}/d_{an}}(s, \vartheta_{an}) & W_{u_{ЗПТ}/d_{bn}}(s, \vartheta_{bn}) & W_{u_{ЗПТ}/d_{cn}}(s, \vartheta_{cn}) & W_{u_{ЗПТ}/j_H}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{d}_{an}(s) \\ \tilde{d}_{bn}(s) \\ \tilde{d}_{cn}(s) \\ \tilde{j}_H(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{i_a/e_a}(s, \vartheta_a) & W_{i_a/e_b}(s, \vartheta_b) & W_{i_a/e_c}(s, \vartheta_c) \\ W_{i_b/e_a}(s, \vartheta_a) & W_{i_b/e_b}(s, \vartheta_b) & W_{i_b/e_c}(s, \vartheta_c) \\ W_{i_c/e_a}(s, \vartheta_a) & W_{i_c/e_b}(s, \vartheta_b) & W_{i_c/e_c}(s, \vartheta_c) \\ W_{u_{ЗПТ}/e_a}(s, \vartheta_a) & W_{u_{ЗПТ}/e_b}(s, \vartheta_b) & W_{u_{ЗПТ}/e_c}(s, \vartheta_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{e}_{ca}(s) \\ \tilde{e}_{cb}(s) \\ \tilde{e}_{cc}(s) \end{bmatrix},$$

где  $\vartheta_{an}, \vartheta_{bn}, \vartheta_{cn}$  – фазы гармонических колебаний, описывающих модулирующие сигналы в каналах ШИМ,  $\vartheta_a, \vartheta_b, \vartheta_c$  – фазы гармонических колебаний, описывающих 3Ф систему напряжений ИП  $e_{ca}, e_{cb}, e_{cc}$ ,  $s$  – оператор Лапласа. Математические выражения ПФ представлены в главе 2 диссертационной работы.

В ходе анализа линеаризованной системы дифференциальных уравнений и полученных передаточных функций было выявлено, что модель АСФ, как объекта управления (ОУ), является нестационарной во времени, так как фазы указанных выше гармонических колебаний изменяются во времени периодически в промежутке от 0 до  $2\pi$ . При допущении, что период их изменения значительно больше постоянной времени АСФ, которая определяется номиналами реактивных элементов схемы, были проанализированы частотные характеристики АСФ как ОУ в

разомкнутом состоянии, показанные на рисунке 3 при различных значениях фаз  $\vartheta_{an}, \vartheta_{bn}, \vartheta_{cn}$  и при симметричном напряжении ИП.

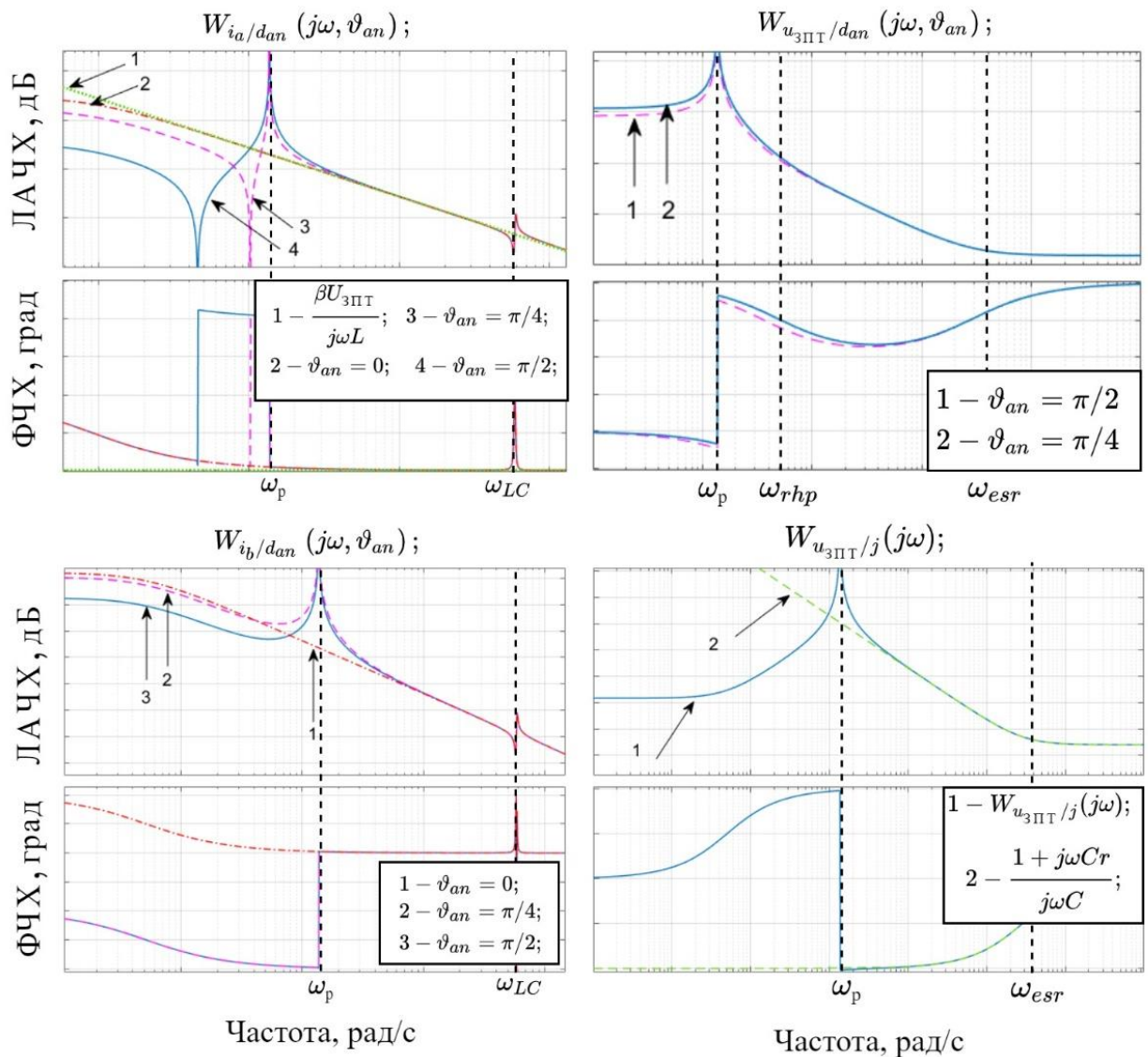


Рисунок 3 – Некоторые частотные характеристики объекта управления с разомкнутой системой управления

Анализ ЧХ разомкнутого объекта показал, что они не зависят от параметров  $\vartheta_{an}, \vartheta_{bn}, \vartheta_{cn}$  в частотном диапазоне  $\omega \geq \omega_p$ , где  $\omega_p \approx E_m(0,667LC)^{-0,5}/U_{3ПТ}$ ,  $E_m$  – амплитуда напряжения ИП,  $U_{3ПТ}$  – среднее значение напряжения ЗПТ. Для решения задачи синтеза системы автоматического управления с заданным уровнем ВИ СЭС по постоянному току предложено ЧХ разомкнутого объекта при управлении в исходном координатном базисе описывать следующими упрощенными выражениями для частотного диапазона  $\omega_p < \omega < (L_c C_\phi)^{-0,5}$

$$W_{i_a/d_{an}}(j\omega) \approx \beta U_{3ПТ} / (j\omega L); \quad W_{u_{3ПТ}/j_h}(j\omega) \approx (1 + j\omega Cr) / (j\omega C),$$

где  $\beta = 1 - L_{\phi n}(3L_{\phi n} + L)^{-1}$ ,  $L = L_\phi + L_c$ ,  $L_c$  – индуктивность ЗФ ИП,  $r$  – последовательное сопротивление конденсатора ЗПТ.

**В третьей главе** диссертационного исследования на основе полученной математической модели разомкнутого АСФ сформулирована методика структурно

параметрического синтеза замкнутой САУ на заданный уровень ВИ СЭС по постоянному току при управлении в исходном  $a-b-c$  координатном базисе.

Для разработки данной методики произведено исследование ЧХ АСФ и установлены одноканальные схемы замещения ОУ в контуре регулирования напряжения ЗПТ при замкнутом трехканальном контуре регулирования входных токов, а также параметры ПФ на основе анализа, произведенного в главе 2. Упрощенная одноканальная схема замещения показана на рисунке 4, а параметры передаточных функций в таблице 1.

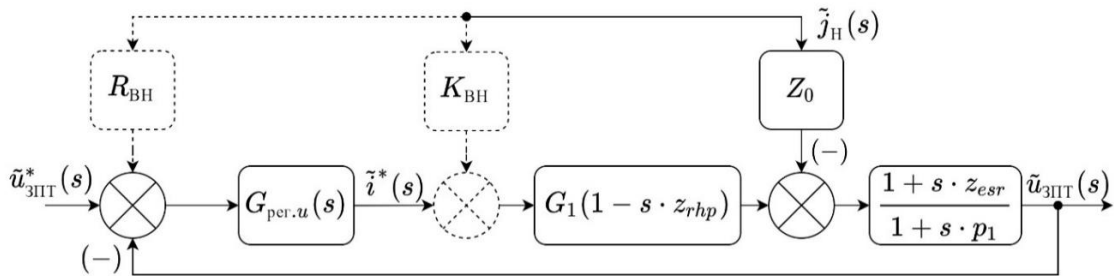


Рисунок 4 – Линейные схемы замещения ОУ при идеальном контуре регулирования тока

Таблица 1 – Параметры ПФ, показанных на рисунке 4

ПФ	Символьное выражение	Расшифровка
$Z_{\text{ВЫХ}}^{\text{к.т}}(s) = -\frac{\tilde{u}_{\text{ЗПТ}}(s)}{\tilde{j}_H(s)}$	$Z_0 \frac{1 + z_{esr}s}{1 + p_1s}$	$z_{esr} = rC; Z_0 = U_{\text{ЗПТ}}J_H^{-1};$ $p_1 = CU_{\text{ЗПТ}}J_H^{-1}$
$W_{u_{\text{ЗПТ}}/i^*}(s) = \frac{\tilde{u}_{\text{ЗПТ}}(s)}{\tilde{i}^*(s)}$	$G_1 \frac{(1 - z_{rhp}s)(1 + z_{esr}s)}{1 + p_1s}$	$G_1 \approx \frac{3E_m}{2J_H} + \frac{2r_1U_{\text{ЗПТ}}}{E_m};$ $z_{rhp} \approx (2/3)J_H L U_{\text{ЗПТ}} E_m^{-2};$

В таблице 1  $J_H$  – среднее значение тока нагрузки ЗПТ в точке линеаризации,  $r_1 = r_\phi + r_c$ ,  $r_c$  – последовательное сопротивление 3Ф источника питания.

Методика структурно-параметрического синтеза САУ АСФ включает два случая: **управление с обеспечением астатизма** по напряжению ЗПТ и **управление с мягкой внешней характеристикой**. При этом, управление с мягкой внешней характеристикой может быть реализовано как на основе самонастраивающегося П-регулятора, так и на основе компенсационной связи по току нагрузки (пунктирная линия на рисунке 4). Исходные данные методики включают параметры силовой схемы, указанные на рисунке 1, параметры необходимые для расчета величин в таблице 1, требуемый максимальный уровень ВИ  $Z_{max}$  и требуемый уровень  $R_{ВН}$ , который определяет величину ЛАЧХ ВИ на нулевой частоте. Методика синтеза представлена в виде блок-схемы на рисунке 5. Также, в третьей главе представлены результаты верификации полученных соотношений и методики синтеза САУ АСФ на основе имитационной модели, построенной в *MatLab/Simulink* с использованием библиотеки *Simscape Power Systems* и встроенного инструмента анализа частотных

характеристик *Frequency Response Estimation*. Результаты верификации показаны на рисунке 6.

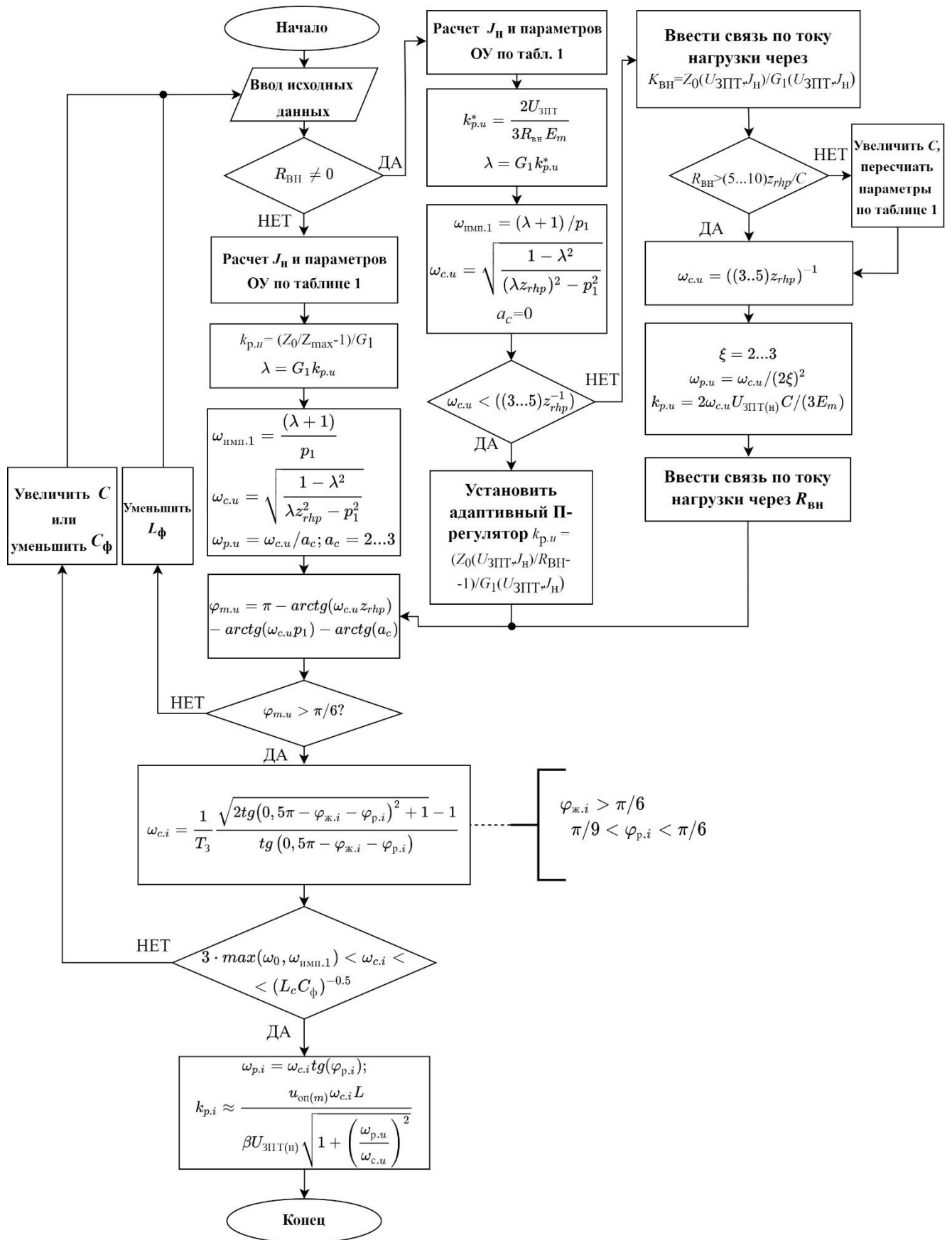


Рисунок 5 – Методика структурно-параметрического синтеза САУ АСФ в виде блок-схемы

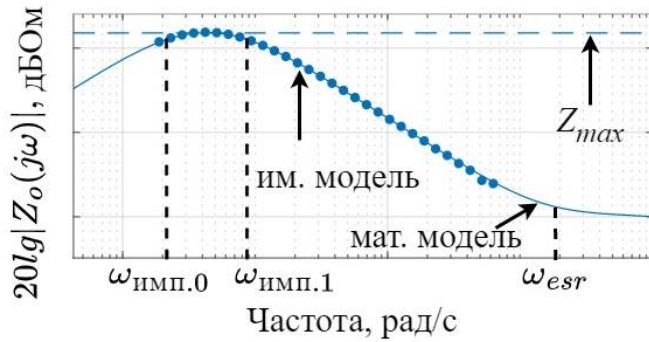


Рисунок 6 – Верификация методики с помощью имитационной модели

кой переменного тока в исследуемой СЭС, а также блоками, реализующими расчет компенсационных воздействий, необходимых для исключения данных составляющих из состава полной мощности, потребляемой от 3Ф ИП.

С целью исключения высших гармонических (ВГ) составляющих в токе, потребляемом нагрузкой переменного тока, в структуру САУ АСФ вводится три режекторных фильтра (РФ), осуществляющих декомпозицию тока на основную гармоническую составляющую с частотой напряжения ИП и составляющие с частотой отличной от частоты напряжения ИП. Такой фильтр описывается следующей ПФ в  $z$ -изображениях

$$W_{\text{РФ}}(z) = \frac{1 - 2 \cdot \cos(\omega_c T_B) \cdot z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2 \cdot r \cdot \cos(\omega_c T_B) \cdot z^{-1} + r^2 \cdot z^{-2}},$$

где  $\omega_c$  – частота напряжения 3Ф ИП,  $T_B$  – период выборки значений сигнала тока нагрузки,  $r$  – постоянная фильтра, отвечающая за ширину полосы заграждения. Выходной сигнал данного блока может быть использован как сигнал задания в трехканальный контур регулирования с целью компенсации ВГ составляющих тока нагрузки.

Для компенсации реактивной мощности сдвига и несимметрии в систему вводятся блоки оценки уровней реактивной и активной мощности, потребляемой нагрузкой, а также блоки расчета компенсационных воздействий в виде тока задания, работающие в соответствии со следующими соотношениями

$$\bar{Q}_{(k)}(t) = \frac{\omega_c}{\pi} \int_{t-\pi/\omega_c}^t u_{c(k)}^{+90}(\tau) \cdot [i_{н(k)}(\tau) - i_{\text{ВГ}(k)}^*(\tau)] d\tau,$$

$$\bar{P}_{(k)}(t) = \frac{\omega_c}{\pi} \int_{t-\pi/\omega_c}^t u_{c(k)}(\tau) \cdot [i_{н(k)}(\tau) - i_{\text{ВГ}(k)}^*(\tau)] d\tau,$$

где  $\bar{Q}_{(k)}(t)$  и  $\bar{P}_{(k)}(t)$  – скользящее среднее оценки реактивной и активной мощностей, нелинейной нагрузки за полупериод напряжения ИП,  $u_{c(k)}^{+90}(\tau)$  и  $u_{c(k)}(\tau)$  – сдвинутый на 90 эл. град., и исходный сигналы измеренных фазных напряжений 3Ф ИП,  $i_{н(k)}(\tau)$  и  $i_{\text{ВГ}(k)}^*(\tau)$  – исходный сигнал тока нагрузки и сигнал с выхода РФ.

**В четвертой главе** диссертационной работы представлено решение задачи повышения основных показателей качества электрической энергии, указанных в первой главе работы на основе АСФ с синтезированной ранее системой управления. Для решения данной задачи САУ АСФ была дополнена блоками, реализующими алгоритм пофазной оценки составляющих неактивной мощности, потребляемой нагрузкой

Работа блоков вычисления компенсационных воздействий в виде токов задания в трехканальный контур регулирования токов АСФ осуществляется по следующим соотношениям

$$i_{p(k)}^*(t) = \frac{3 \cdot \bar{Q}_{(k)}(t) \cdot u_{c(k)}^{+90}(t)}{u_{c(a)}^2(t) + u_{c(b)}^2(t) + u_{c(c)}^2(t)}; \quad i_{a(k)}^*(t) = \frac{3 \cdot (\bar{P}_{cp}(t) - \bar{P}_{(k)}(t)) \cdot u_{c(k)}(t)}{u_{c(a)}^2(t) + u_{c(b)}^2(t) + u_{c(c)}^2(t)},$$

где  $i_{p(k)}^*$  и  $i_{a(k)}^*$  – компенсационные воздействия для компенсации реактивной мощности сдвига и мощности несимметрии соответственно,  $\bar{P}_{cp}(t) = \bar{P}_{(a)}(t) + \bar{P}_{(b)}(t) + \bar{P}_{(c)}(t)$ . Полученные в результате вычисления компенсационные составляющие суммируются с составляющими тока компенсации ВГ и тока задания для стабилизации напряжения ЗПТ, как показано на рисунке 7.

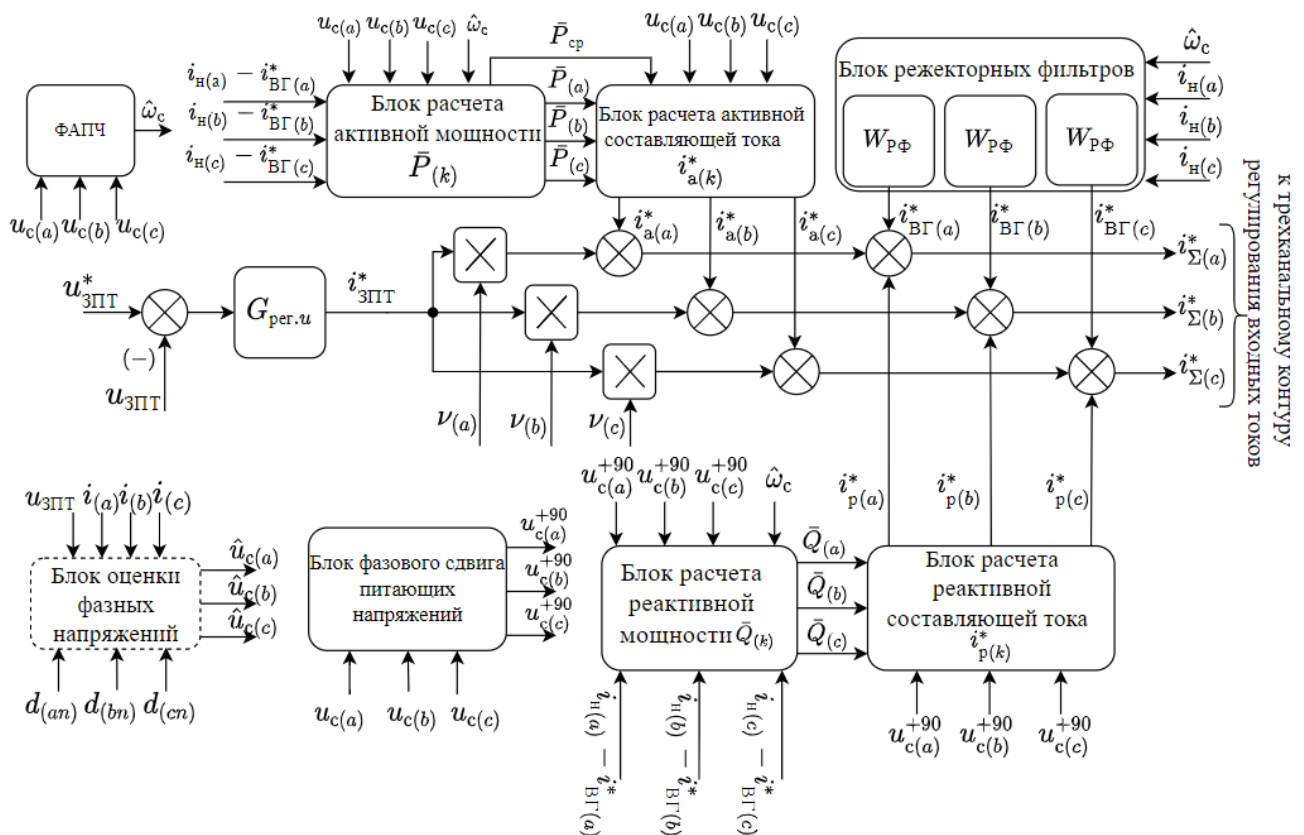


Рисунок 7 – Функциональная схема предложенной структуры САУ АСФ

Схема САУ АСФ, показанная на рисунке 7, содержит блоки фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для изменения коэффициентов в блоках САУ в соответствии с изменяющейся частотой напряжения ИП, а также блок оценки фазных напряжений (БОФН), необходимый для обеспечения возможности функционирования алгоритма управления без использования датчиков напряжения 3Ф источника питания СЭС. Алгоритм работы БОФН основывается на пошаговом расчете напряжения по встроенной в САУ математической модели цепей переменного тока АСФ, как показано на рисунке 8 для фазы  $a$ . Структуры блоков для фаз  $b$  и  $c$  могут быть получены путем замены соответствующих фазных переменных. Входными сигналами блока являются: измеренные значения токов дросселей  $L_{\phi}$  на  $n$ -ом такте



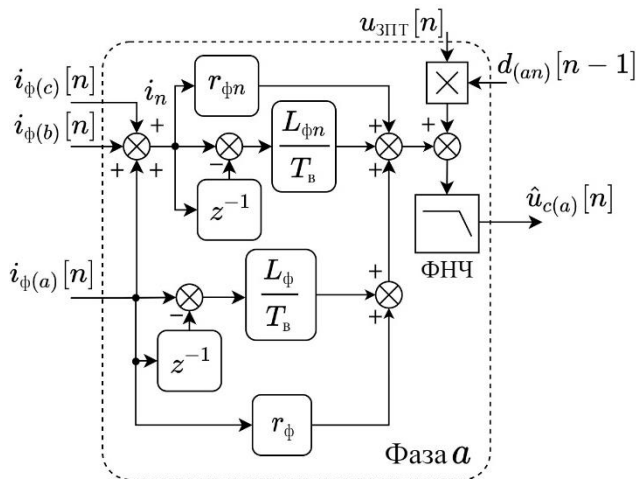
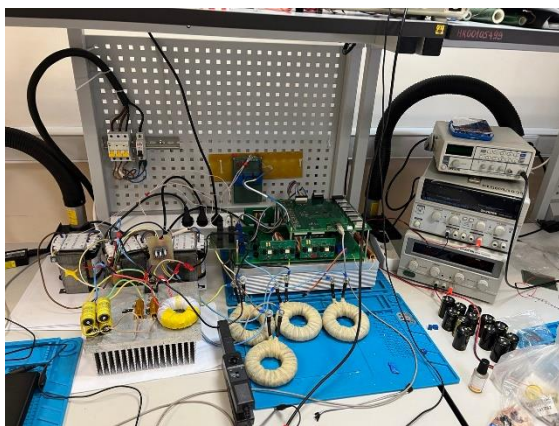


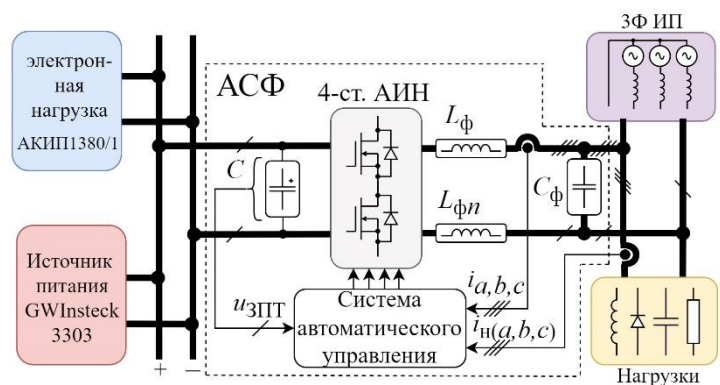
Рисунок 8 – Схема блока оценки фазного напряжения без использования датчиков переменного напряжения

в тексте диссертационной работы. В данной главе работы также представлены результаты имитационного моделирования СЭС с предложенным алгоритмом управления, подтверждающие выполнение поставленных задач разработанным алгоритмом управления.

В пятой главе работы представлены результаты практической верификации предложенных алгоритмов управления и методики синтеза САУ АСФ. Фотография разработанного экспериментального макета СЭС показана на рисунке 9 а, схема на рисунке 9 б. Некоторые параметры макета:  $L_\phi = L_{\phi n} = L1...4 = 400$  мкГн,  $C = 1150$  мкФ,  $U_{ЗПТ} < 800$  В,  $i_\phi < 40$  А, частота коммутации SiC-MOSFET (СЗМ0032120D) и выборки значений  $f_0 = 50$  кГц, 3Ф ИП на основе трансформаторов ОСО-0,4 кВА 220/12 В, источник постоянного напряжения GWInstek 3303, САУ на основе МК STM32H743VIT6, электронная нагрузка ЗПТ АКПП-1380/1 (0...3 А).



а)



б)

Рисунок 9 – Фотография и функциональная схема макетного образца СЭС

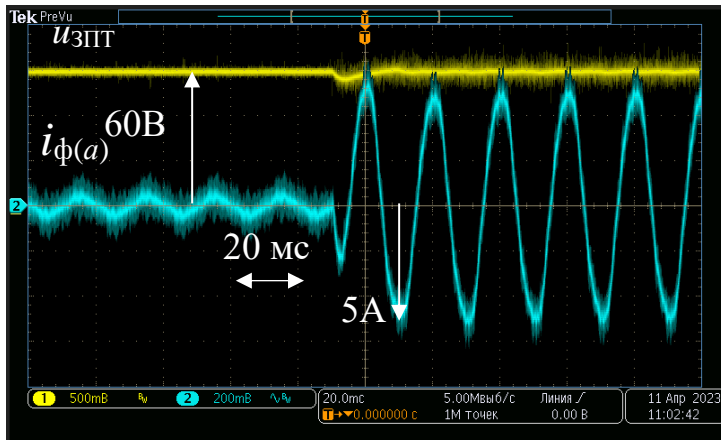
В результате практической верификации получены осциллограммы напряжения ЗПТ, тока, потребляемого от 3Ф ИП при работе преобразователя на нагрузку постоянного тока со стабилизацией напряжения ЗПТ на уровне 60 В, а также при компенсации НКМ 3Ф и 1Ф нелинейных нагрузок.

работы САУ ( $i_{\phi(a-c)}[n]$ ), измеренное напряжение ( $u_{ЗПТ}[n]$ ) и сигнал модуляции ШИМ с задержкой на один такт работы САУ ( $d_{(kn)}[n-1]$ ). Выходным сигналом является сигнал оценки мгновенного значения фазного напряжения ИП.

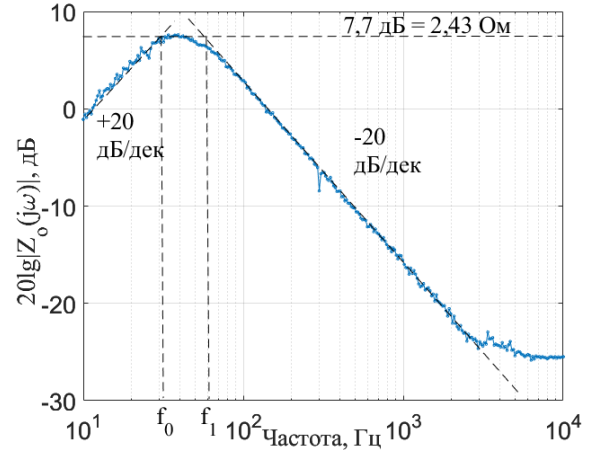
Для исключения тока нулевого проводника в системе с несимметричной 3Ф системой напряжений ИП предложена модификация алгоритма управления, показанного на рисунке 7, функционирующая на основе симметрирования действующих значений токов за период напряжения ИП, которая более подробно описана



На рисунке 10 а показаны осциллограммы наброса нагрузки ЗПТ скачком от холостого хода до 2,25 А, а на рисунке 10 б показана ЛАЧХ ВИ СЭС измеренная с помощью частотного анализатора AP300 при  $k_{p,u} = 1$ ,  $\omega_{p,u} = 200$ . При этом, расчетная величина максимума АЧХ ВИ составила  $\max(|Z_o(j\omega)|)_p = 2,36$  Ом, измеренная  $\max(|Z_o(j\omega)|)_и = 2,43$  Ом, относительная погрешность составила не более 3%.



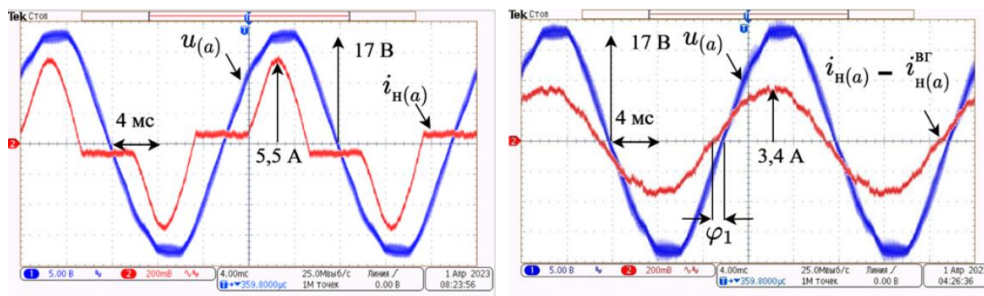
а)



б)

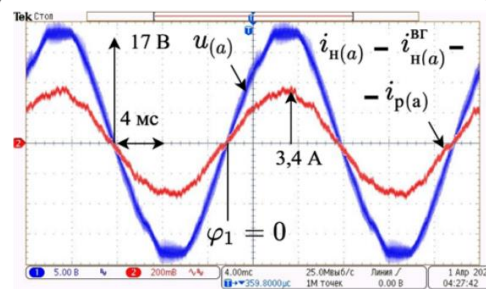
Рисунок 10 – Стабилизация напряжения ЗПТ: а) – ток ИП и напряжение ЗПТ при изменении нагрузки, б) – измерение ВИ СЭС на стороне постоянного тока

На рисунке 11 показан процесс компенсации неактивных компонент мощности несимметричной нагрузки в виде однофазного диодного моста с  $RLC$ -цепью в нагрузке  $L = 1400$  мкГн,  $C = 800$  мкФ,  $R = 3,4$  Ом (11 а) – исходные ток и напряжение нагрузки 11 б) – ток и напряжение после компенсации ВГ тока, 11 в) – ток и напряжение после компенсации реактивной мощности сдвига). Алгоритм выполнен с использованием датчика напряжения ИП.



а)

б)



в)

Рисунок 11 – Осциллограммы полученные в режиме компенсации неактивной мощности нелинейной нагрузки

На рисунке 12 показан результат компенсации нагрузки с одновременным электропитанием нагрузки постоянного тока без использования датчика напряжения ИП.

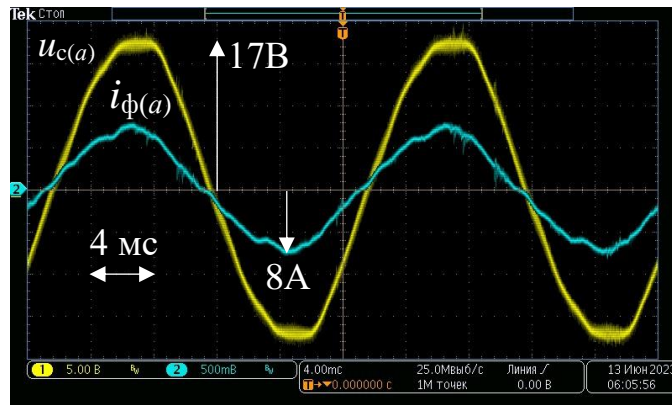


Рисунок 12 – Осциллограмма фазных тока и напряжения 3Ф ИП при использовании алгоритма управления без датчиков напряжения ИП

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В ходе диссертационного исследования была решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности активного силового фильтра, функционирующего в составе 3Ф четырехпроводной СЭС и процесса компенсации НКМ за счет разработки алгоритма управления АСФ с упрощенными программно-аппаратными требованиями к системе управления с пофазной компенсацией НКМ. В качестве основных результатов работы выделяются следующие:

1. Разработана математическая модель АСФ, который подключается к 3Ф четырехпроводной электрической сети параллельно нелинейной нагрузке переменного тока через силовой  $LC$ -фильтр и дроссель нулевого проводника, которая позволяет проанализировать частотные характеристики АСФ, как объекта управления в разомкнутом состоянии.

2. С учетом возможности СЭС с АСФ осуществлять электропитание нагрузок постоянного тока разработана методика структурно-параметрического синтеза САУ АСФ, позволяющая синтезировать его систему управления на заданную форму и максимальное значение ЛАЧХ выходного импеданса СЭС в ЗПТ, обеспечивающее ее устойчивость, при пофазном управлении входными токами АСФ.

3. Предложен алгоритм пофазной покомпонентной компенсации НКМ в 3Ф четырехпроводной СЭС с АСФ при пофазном управлении токами, обладающий по сравнению с аналогами меньшими требованиями к программно-аппаратной части АСФ при сохранении качества компенсации, чем достигается повышение эффективности АСФ и процесса компенсации НКМ.

4. Предложена модификация алгоритма управления АСФ в 3Ф четырехпроводной СЭС позволяющая осуществлять электропитание нагрузок постоянного тока и компенсацию НКМ в отсутствии сигнала с датчика переменного напряжения 3Ф источника питания СЭС.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### *Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Синтез системы управления сетевым преобразователем с ограниченным уровнем выходного импеданса в a-b-c системе координат / И. В. Александров, О. В. Нос, И. А. Баховцев, Н. А. Севостьянов // Интеллектуальная электротехника. – 2022. – № 4(20). – С. 4-21. – DOI 10.46960/2658-6754\_2022\_4\_04.

2. Анализ и синтез алгоритма управления активным силовым фильтром с независимым регулированием токов фаз для четырехпроводных систем / И. В. Александров, О. В. Нос, С. А. Харитонов, М. А. Дыбко // Электропитание. – 2021. – № 3. – С. 38-56.

3. Абуэлсауд, Р. С. Результаты экспериментов автономной системы электроснабжения на основе управления с прогнозирующей моделью / Р. С. Абуэлсауд, И. В. Александров, Г. С. Леус // Электропитание. – 2019. – № 3. – С. 3-14.

### *Зарегистрированные патенты на полезные модели и свидетельство о регистрации программы ЭВМ:*

1. Патент на полезную модель № 211992 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/00. Трехфазный активный фильтр для сетей с несимметричной нагрузкой : № 2022105363 : заявл. 01.03.2022 : опубл. 30.06.2022 / И. В. Александров, О. В. Нос ; заявитель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

2. Патент на полезную модель № 207731 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/01, H02M 1/12. Трехфазный силовой фильтр высших гармоник тока : № 2021119910 : заявл. 07.07.2021 : опубл. 12.11.2021 / И. В. Александров, О. В. Нос ; заявитель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022685338 Российская Федерация. Программный модуль вычисления активной и реактивной составляющих мощности нелинейной нагрузки : № 2022684439 : заявл. 12.12.2022 : опубл. 22.12.2022 / И. В. Александров ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Интеллектуальные силовые преобразователи".

### *Публикации в материалах зарубежных конференций и периодических изданиях, входящих в базу данных Scopus и/или Web of Science:*

1. Ivan V. Alexandrov; Oleg V. Nos; Thomas Ellinger; Regina Yu. Sarakhanova Per-Phase Output Current Control of 4-Leg Active Power Filter Based on Adaptive Notch Filter // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). - Altai, Russian Federation: 2022, P. 388-393, DOI 10.1109/EDM55285.2022.9855148.

2. Three-Phase Grid Interface Converter Control System Design to Limit a DC-side Output Impedance / I. V. Alexandrov, R. L. Gorbunov, O. V. Nos, D. A. Shtein // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron

Devices, EDM : 22, Aya, Altai Region, 30 июня – 04 2021 года. – Aya, Altai Region, 2021. – P. 369-374. – DOI 10.1109/EDM52169.2021.9507600.

3. Alexandrov I. V. Combined PWM algorithm for voltage source inverter with microprocessor control system / I. V. Alexandrov, I. A. Bahovtsev. – DOI 10.1109/EDM.2019.8823449. – Text : direct // 20 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM–2019) : conf. proc., Altai Republic, Erlagol, 29 June – 3 July, 2019. – [S. 1.] : IEEE, 2019. – P. 580–585

4. Assessment of Model Predictive Voltage Control for Autonomous Four-Leg Inverter / R. Aboelsaud, A. Ibrahim, A. G. Garganeev, Alexandrov I.V, Diab A.A.Z. // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 101163-101180. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2996753.

5. Aleksandrov I. V. Step-by-step design of two-loop control system for boost DC-DC converter / I. V. Aleksandrov, N. A. Sevostyanov, R. L. Gorbunov. – DOI 10.1109/EDM.2018.8435046. – Text : direct // 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM-2018) : proc., Erlagol, Altai, 29 June – 3 July 2018. – IEEE Computer Society, 2018. – P. 574–579.

***Публикации по теме диссертационной работы в сборниках трудов всероссийских конференций молодых ученых***

1. Александров, И. В. Снижение выходного импеданса активного выпрямителя напряжения при работе на импульсную нагрузку / И. В. Александров, О. В. Нос, И. А. Баховцев // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов в 9 ч., Новосибирск, 30 ноября – 04 2020 года. Том Часть 6. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2020. – С. 3-7.

2. Александров, И. В. Оптимальное проектирование LC - фильтра для системы электроснабжения на основе автономного инвертора напряжения с дополнительной транзисторной стойкой / И. В. Александров, И. А. Баховцев // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов. В 9-ти частях, Новосибирск, 02–06 декабря 2019 года / Том Часть 6. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. – С. 3-7.

3. Александров, И.В. Алгоритм бездатчиковой синхронизации двунаправленного преобразователя с четырехпроводной сетью переменного тока / И.В. Александров // ТРУДЫ XVI всероссийской научно-практической конференции «Научная сессия НТИ НИЯУ МИФИ – 2022» . – Новоуральск : Изд-во НТИ НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 97-102. – ISBN 5-332-00051-0

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383)346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объём 1,25 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 2540. Подписано в печать 16.10.2023 г.