

**ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи



Рудник Владимир Евгеньевич

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ В  
РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.4.3 – Электроэнергетика

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:**

**Суворов Алексей Александрович**

кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, г. Томск

**Официальные оппоненты:**

**Илюшин Павел Владимирович**

доктор технических наук, ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики, главный научный сотрудник

**Суслов Константин Витальевич**

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии

Защита состоится «28» февраля 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.17 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.17  
кандидат технических наук



А.А. Суворов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Проблема и её актуальность.** В настоящее время многие ведущие страны заинтересованы в декарбонизации, основанной на сокращении традиционной генерации на базе ископаемого топлива. Российской Федерацией, а также рядом других стран, подписано Парижское соглашение по климату, что накладывает определенные обязательства по снижению углеродных выбросов, в частности, за счет перехода на «зеленую» энергетику. Одним из основных направлений развития «зеленой» энергетики является широкомасштабное внедрение в электроэнергетические системы (ЭЭС) новых генерирующих устройств (ГУ), функционирующих на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Доля возобновляемых источников энергии в мировой энергетике в период с 2020 по 2021 г. оставалась стабильной (28,1%), что выше уровня 2019 г. (26,3%) почти на 2%. В 2022 г. выработка электроэнергии из возобновляемых источников выросла благодаря активному внедрению фотоэлектрических солнечных электростанций (ФСЭС) и ветроэлектростанций (ВЭС): ФСЭС +21% и ВЭС +11%, а установленная мощность ВЭС и ФСЭС на 2021 г. составила соответственно 828,4 ГВт и 891,3 ГВт; на 2022 г. – 925,6 ГВт и 1100,9 ГВт. Одной из основных причин значительного прироста установленной мощности именно ФСЭС является существенное удешевление технологий производства солнечных элементов (СЭ). По состоянию на 2023 год в Единой энергосистеме (ЕЭС) России работает более 70 ФСЭС установленной мощностью 1,7 ГВт в 11 регионах РФ, а до конца 2034 г. на территории РФ планируется ввести в эксплуатацию мощности равные почти 7 ГВт возобновляемой генерации.

Особенностью ФСЭС является отсутствие прямого сопряжения с сетью и использование для их подключения к ЭЭС сетевого инвертора (СИ), в основном функционирующего на базе статического преобразователя напряжения (СПН). В результате внедрения таких ФСЭС с СИ существенно изменяются динамические свойства энергосистем из-за отличающийся динамики функционирования СИ и его системы управления по сравнению с традиционной генерацией: 1) увеличение скорости переходных процессов из-за снижения общей инерции энергосистемы может становиться причиной неправильной работы противоаварийной автоматики; 2) ток короткого замыкания (КЗ) от ФСЭС ограничен СИ, его величина находится в диапазоне от 0 о.е. до 1.5 о.е., что может приводить к существенным просадкам напряжения и значительным колебаниям режимных параметров после снятия КЗ, также изменение величины тока КЗ может приводить к неправильным срабатываниям релейной защиты (РЗ); 3) несогласованное действие системы автоматического управления (САУ) СИ с системами управления другого оборудования может приводить к нарастающим колебаниям режимных параметров после возмущений; 4) усугубление аварийной ситуации в ЭЭС ввиду несоответствия поведения ФСЭС требованиям их функционирования в аварийных режимах (неправильная настройка FRT характеристик, (Fault Ride Through)); 5) в блоке фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и внутреннем контуре управления током (КУТ), которые являются основными каналами системы управления СИ, используются большие коэффициенты усиления, что может

приводить к колебаниям режимных параметров. В итоге обозначенные особенности приводят к существенному влиянию ФСЭС с СИ на все существующие виды устойчивости и даже к возникновению новых, выделяемых зарубежными специалистами (устойчивость, определяемая функционированием силового преобразователя – «converter-driven stability»).

Сопутствующие обозначенным особенностям проблемы особенно остро стоят при внедрении данных объектов в региональные энергосистемы и энергорайоны (110 кВ и ниже) с достаточно крупными узлами местной нагрузки. Такие энергорайоны могут быть классифицированы как слабые электрические сети с помощью коэффициента отношения короткого замыкания (ОКЗ) в соответствии с международной терминологией, который отражает отношение мощности короткого замыкания сети переменного тока при номинальном напряжении в точке подключения к шинам внедрения ФСЭС. Именно в таких сетях в последнее время по всему миру возникают незатухающие колебания различной частоты, приводящие к повреждению силового оборудования, нарушению устойчивости и распространяющиеся на целые энергообъединения.

Для решения возникающих проблем, в том числе связанных с колебаниями режимных параметров при функционировании ФСЭС, необходима информация о едином непрерывном спектре квазиустановившихся и переходных процессов в ФСЭС и ЭЭС в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы. Известная специфика и сложность ЭЭС исключают возможность получения обозначенной информации, особенно аварийного характера, как натурным путем, так и посредством физического моделирования, поэтому основным способом её получения является детальное математическое моделирование. Одним из вариантов такого моделирования является методологически альтернативный комплексный подход, представляющий из себя гибридное моделирование, позволяющий для каждого аспекта решаемой сложной задачи детальное моделирование ФСЭС в составе ЭЭС разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, объединение которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом.

**Степень разработанности темы исследования.** В развитие отечественной и мировой солнечной энергетики внесли большой вклад российские ученые: Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.А. Баум, В.К. Баранов, В.С. Вавилов, А.М. Васильев, В.М. Евдокимов, А.П. Ландсман, Э.В. Тверьянович и ряд других выдающихся ученых.

Изучением проблемы слабых сетей и вопросов, связанных с внедрением объектов ВИЭ, в том числе ФСЭС, занимаются учёные: П.В. Илюшин, К.В. Суслов, В.В. Елистратов, Е.Н. Соснина, Ф.Л. Бык, Б. В. Лукутин, С. Г. Обухов, А.А. Суворов, Qi Hu, V. Terzija, Lijun Fu, Fan Ma, Ji. Feng, Y. F. Wang, Li Y. Wei, J. Z. Zhou, H. Ding, S. Fan, Y.Zhang и др.

Вопросам моделирования электроэнергетических систем посвящены фундаментальные труды: В.А. Веникова, Н.И. Воропая, П.И. Бартоломея, Ю.Е. Гуревича, А.С. Гусева, В.А. Строева, Prabha S. Kundur, А.А. Горева, П.С. Жданова, а также исследования А.В. Паздерина, А.Н. Беляева, А.Г. Русиной, А.Г. Фишова,

Rajapandian Ayyanar, John Undrill, Vijay Vittal, Qiuhua Huang, Brian Keel, Jose Silva, Pouyan Pourbeik, Wenzong Wang, Deepak Ramasubramanian, Deepa Kundur.

Однако проблема детального моделирования ФСЭС в составе реальных ЭЭС раскрыта не полностью и безусловно является актуальной для отечественной и мировой электроэнергетической науки и практики, учитывая возрастающее количество колебаний различной частоты и тяжёлые последствия к которым они приводят.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является разработка концепции и средств её реализации для всережимного моделирования ФСЭС в составе ЭЭС.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ влияния внедрения ФСЭС в существующие ЭЭС, в том числе в слабые электрические сети, на протекание переходных процессов в ФСЭС и ЭЭС в целом.

2. Анализ основных используемых в настоящее время средств моделирования ФСЭС в составе ЭЭС.

3. Выявление и обоснование факторов, препятствующих решению проблемы детального моделирования ФСЭС в слабых сетях с помощью существующих программных и программно-аппаратных комплексов моделирования ЭЭС.

4. Разработка теоретически и практически обоснованной концепции всережимного моделирования ФСЭС в ЭЭС, а также структуры и принципов построения средств её реализации.

5. Проведение экспериментальных исследований, подтверждающих свойства и возможности разработанной концепции и средств её реализации, необходимые для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ФСЭС в ЭЭС.

**Предметом исследования** являются переходные процессы в ФСЭС, функционирующей в составе ЭЭС.

**Объектом исследования** является детальная модель ФСЭС, подключаемая к электрической сети с помощью СИ.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработана концепция детального моделирования ФСЭС в составе ЭЭС и программно-аппаратные средства её реализации в виде специализированного гибридного процессора (СГП), в которых предполагается использование физических моделей для повышающего преобразователя постоянного тока и сетевого инвертора, что позволяет воспроизводить динамику цепи постоянного тока и функционирование быстродействующих систем управления ФСЭС: блока ФАПЧ и КУТ.

2. Определено, что модернизация обобщенной математической модели ФСЭС путём добавления только блока ФАПЧ является недостаточной для воспроизведения колебаний режимных параметров различной частоты, возникающих по различным причинам при функционировании ФСЭС в слабых электрических сетях. Необходимым в данном случае также является учёт в обобщенной математической модели ФСЭС всей структуры КУТ, основу которого, как правило, составляют пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы во вращающихся с частотой сети осях  $d, q$ .

**Теоретическая значимость работы:**

1. Разработанный в рамках концепции всережимного моделирования ФСЭС в составе ЭЭС подход по использованию физического моделирования для воспроизведения повышающего преобразователя постоянного тока и сетевого инвертора может быть использован для детального моделирования устройств с аналогичной топологией силовых преобразователей: систем накопления электроэнергии на основе аккумуляторных батарей, суперконденсаторов и др., в составе ЭЭС.

2. Определены основные причины существования проблемы моделирования ФСЭС в составе ЭЭС с помощью обобщенных математических моделей, особенно в случае их функционирования в слабых электрических сетях, заключающиеся в исключении динамики работы блока ФАПЧ, цепи постоянного тока, первичного источника энергии и упрощенном представлении контура управления активной мощностью, на основании которых сделаны рекомендации по возможным направлениям модернизации таких моделей в зависимости от решаемых задач, схемно-режимных условий и возмущений.

3. Обоснованы факторы, влияющие на возникновение колебательных процессов в ЭЭС с ФСЭС, среди которых основными являются отношение короткого замыкания в точке подключения ФСЭС к ЭЭС, в случае уменьшения которого вероятность колебаний режимных параметров возрастает, вторым является полоса пропускания блока фазовой автоподстройки частоты.

**Практическая значимость работы.** Разработанные средства детального моделирования ФСЭС (патент РФ RU 2785362 С1) позволяют получать информацию о режимах и процессах в ФСЭС, функционирующих в составе ЭЭС, при нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимую для эффективного решения актуальных для электроэнергетической отрасли задач проектирования и исследования, особенно связанных с воспроизведением колебаний режимных параметров различной частоты при функционировании ФСЭС в слабых электрических сетях в зависимости от схемно-режимных условий и разработкой средств по их демпфированию, анализ которых с помощью широко распространённых средств моделирования не всегда возможен. Полученные результаты и выводы диссертационной работы могут быть актуальны для предприятий и компаний, которые занимаются вопросами проектирования и эксплуатации ФСЭС в составе ЭЭС.

**Методы исследования.** Решение задач, поставленных в диссертационной работе, выполнялось с использованием методов теоретического исследования, имитационного моделирования и экспериментального исследования. При проведении теоретических исследований применялись положения теории автоматического управления, теории электромеханических и электромагнитных переходных процессов. При разработке программно-аппаратных средств моделирования ФСЭС использовались методы анализа линейных и нелинейных электрических цепей, методы математического моделирования ЭЭС. Экспериментальные исследования выполнялись с помощью Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС).

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная концепция детального моделирования ФСЭС в составе ЭЭС и программно-аппаратные средства её реализации в виде СГП позволяют воспроизводить переходные процессы при функционировании ФСЭС в слабых электрических сетях ( $OK3 < 3$  о.е.), особенно связанные с возникновением колебаний режимных параметров различной частоты и амплитуды, благодаря учету топологии и спектра коммутационных процессов в повышающем преобразователе постоянного тока, сетевом инверторе и их быстродействующих системах управления: блок ФАПЧ и КУТ.

2. В сильной электрической сети ( $OK3 > 3$  о.е.) основной причиной погрешности в результатах моделирования, полученных с помощью модернизированной обобщенной математической модели ФСЭС, является исключение динамики функционирования цепи постоянного тока, а в слабой электрической сети ( $OK3 < 3$  о.е.) исключение динамики взаимодействия быстродействующих контуров управления блока ФАПЧ и КУТ, что в случае ультраслабых электрических сетей ( $OK3 < 1,75$  о.е.) приводит к принципиально отличающемуся характеру переходного процесса по сравнению с детальной моделью СГП ФСЭС.

3. Трансформация по различным возможным причинам электрической сети из сильной ( $OK3 > 3$  о.е.) в слабую ( $OK3 < 3$  о.е.) приводит к возникновению незатухающих субсинхронных колебаний режимных параметров ФСЭС различной частоты (от 14 Гц до 56 Гц) в зависимости от полосы пропускания блока ФАПЧ (от 5 Гц до 50 Гц).

4. Использование регулятора с дополнительным субсинхронным демпфирующим управлением в системе автоматического управления сетевого инвертора ФСЭС при их функционировании в слабых электрических сетях ( $OK3 < 3$  о.е.) позволяет демпфировать субсинхронные колебания режимных параметров ФСЭС различной частоты и амплитуды.

### **Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика:**

Пункт 14 – «Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы».

Пункт 16 – «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике».

### **Достоверность результатов исследования подтверждается использованием:**

1. Классических положений и законов теоретической электротехники, математики, теории дифференциального и интегрального исчисления.

2. Теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений.

3. Метода непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений.

4. Теоретически обоснованных и апробированных независимыми исследованиями применяемых математических моделей.

5. Подтверждается соответствием результатов тестовых и экспериментальных исследований.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на 16 международных и всероссийских научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах: Международная научно-техническая конференции «Электроэнергетика глазами молодёжи» 2019 г. (г. Иркутск), 2022 г. (г. Нижний Новгород); V Международная научно-практическая конференция «GEOENERGY-2022» 2022 г. (г. Грозный); Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» 19-25.09.2022 г. (г. Алушта), 09-15.07.2023 г. (о. Ольхон); Конференция Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири по теме: «Планирование и управление электроэнергетическими системами» 07.12.2022 г. (г. Кемерово); International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability. «European Academy for Sustainable Development Certificate of Participation». TMREES23Fr Int'l Conf. Metz-Grand Est – France 08-10.03.2023 г. (Франция); I Всероссийская конференция «Цифровые технологии и платформенные решения для управления развитием электроэнергетики» 23.03.2023 г. (г. Севастополь); выступление с докладом на совместном заседании секций «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы», «Возобновляемая энергетика и гибридные энергетические комплексы» и секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике в рамках «Научно-технического совета Единой энергетической системы НТС ЕЭС» 11.05.2023 г. (г. Москва) и др.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 26 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 6 статей в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus, 1 патент на изобретение, 1 свидетельство на ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Основные результаты работы, связанные с анализом, выявлением и обоснованием проблемы полноты и достоверности моделирования ФЭС в составе ЭЭС, направлением её решения, созданием специализированного гибридного процессора (СП) ФЭС, позволяющего выполнять всережимное моделирование в реальном времени и на неограниченном интервале ФЭС в ЭЭС, и экспериментальных средств в целом, а также проведение с их помощью экспериментальных исследований, подтверждающих определяемые концепцией свойства и возможности, получены лично автором диссертационной работы.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использовались:

1. В рамках гранта Российского научного фонда, Договор № 21-79-00275 от 27.07.21 г. «Разработка методов и средств повышения колебательной устойчивости электроэнергетических систем с помощью объектов возобновляемой генерации», сроки выполнения: 27.07.21 – 30.06.23 гг.

2. В рамках гранта Российского научного фонда, Договор № 21-79-00129 от 27.07.2021 «Разработка технологии управления силовыми преобразователями генерирующих установок на базе возобновляемых источников энергии для обеспечения всережимной устойчивости современных энергообъединений», сроки выполнения: 27.07.21 – 30.06.23 гг.

3. В рамках гранта Российского научного фонда, Договор № 18-79-10006 от 02.08.2018 «Исследование проблемы достоверности расчетов режимов и процессов в электроэнергетических системах с активно-адаптивными сетями и распределенной генерацией и разработка методики их всережимной верификации», сроки выполнения: 02.08.18 – 31.12.21 гг.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из списка сокращений и терминов, введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 148 наименований, содержащих 154 страницы, 11 таблиц, 109 рисунков, а также 1 приложение на 2 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обозначена проблема, рассматриваемая в диссертационной работе, и обоснована её актуальность, сформулированы цель и задачи исследований, сформулирована научная новизна, практическая и теоретическая значимость, приведены выносимые на защиту основные положения, сведения о методах исследования, достоверности результатов, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** представлен анализ динамики внедрения генерирующих устройств на базе ВИЭ в Единую энергетическую систему России и в мире в целом. Отмечено, что особенностью ФЭС является использование СИ, в основном СПН на базе IGBT-транзисторов, для подключения к электрической сети. Внедрение таких устройств существенно изменяет свойства энергосистем ввиду отличающейся динамики их функционирования по сравнению с традиционным оборудованием ЭЭС. В итоге в мировой практике стали выделять новый вид устойчивости ЭЭС, относящийся к функционированию СИ. Это обусловлено тем, что в разных энергосистемах мира наблюдаются явления, связанные с возникновением затухающих и незатухающих колебаний режимных параметров (напряжение, активная и реактивная мощности, ток и др.) различной частоты, которые возникают как в установившихся режимах, так и после малых и больших возмущений в ЭЭС и приводят к аварийному отключению генерирующего оборудования, а в некоторых случаях даже к его повреждению. Особенно остро стоит данная проблема при внедрении ФЭС в ЭЭС, в которых имеются удаленные энергорайоны с достаточно крупными узлами местной нагрузки и достаточно высоким процентом внедрения ФЭС. Такой сценарий характерен для мировой энергетики, поскольку внедрение ФЭС сильно привязано к наличию необходимых энергетических ресурсов, что зачастую означает значительную удаленность от централизованной части ЭЭС, но в то же время позволяет обеспечить необходимый уровень генерации непосредственно в месте потребления. Обозначенные энергорайоны могут быть классифицированы как слабые электрические сети, в соответствии с международной терминологией, и характеризуются наличием слабых

электрических связей в своей топологии, малой мощностью традиционных источников генерации относительно суммарной мощности нагрузки. Данное свойство электрической сети характеризуется с помощью коэффициента ОКЗ вычисляемого по формуле 1.

$$OKZ = \frac{S_{min}}{S_{ВИЭ}} \approx \frac{S_{min}}{P_{ВИЭ}} \quad (1)$$

где  $S_{min}$  – минимальное значение мощности короткого замыкания в точке подключения ВИЭ к сети без учета влияния ВИЭ (МВА),  $S_{ВИЭ}$  – номинальная полная мощность ВИЭ (МВА),  $P_{ВИЭ}$  – номинальная активная мощность ВИЭ (МВт) (при  $\cos\varphi=1$ ).

При значениях  $OKZ > 3$  о.е. электрическая сеть считается сильной, если  $OKZ < 3$  о.е., то электрическая сеть считается слабой. Именно в слабых и ультраслабых электрических сетях возникают субсинхронные колебания, приводящие к нарушению устойчивости как в самих энергорайонах, так и распространяющиеся на целые энергообъединения. До настоящего времени уже зафиксировано 19 случаев с аналогичными колебаниями, получивших официальное подтверждение и освещение в научной периодике, которые наблюдались в энергосистемах разных стран со значительной долей возобновляемой генерации (15% и более) с 2007 года (Миннесота (США) 2007 г., Техас (США) 2009 и 2017 гг., северные районы КНР 2012-2013 гг. и др.)

Исходя из результатов проведённого анализа возникающих колебаний режимных параметров при функционировании объектов ВИЭ, в том числе ФЭС, в ЭЭС, выделено несколько основных, влияющих факторов:

1. Величина ОКЗ. Уровень внедрения ФЭС, согласно статистике, продолжает непрерывно увеличиваться, тем самым приводит к тому, что ОКЗ сети становится меньше. Слабая система становится более чувствительной к возникающим колебательным процессам.

2. Параметры САУ СИ ФЭС. Диапазон, частота и амплитуда колебаний существенно зависит от полосы пропускания блока ФАПЧ.

Также сделан вывод, что основным способом изучения таких колебаний и разработкой механизмов по их демпфированию является математическое моделирование реальных ЭЭС. Поскольку возникновение колебаний зависит от ОКЗ, которое в том числе формируется схемно-режимными особенностями конкретной энергосистемы. Как следует из второго фактора, структура и настройки САУ СИ ФЭС влияют на характер этих субсинхронных колебаний, что, соответственно, приводит к необходимости их учёта в математической модели ФЭС. Причём для анализа характера распространения субсинхронных колебаний и их влияния на остальное оборудование ЭЭС возникает необходимость в использовании для него аналогичных по детальности математических моделей.

Рассмотрены подходы к моделированию ЭЭС с ФЭС с помощью программно-вычислительных (ПВК) и программно-аппаратных (ПАК) комплексов. Выявлено, что в настоящее время основными моделями ФЭС являются «обобщённые модели» и их различные модернизации, которые используются в ПВК для анализа устойчивости

ЭЭС, в том числе со слабыми электрическими сетями. Общая структурная схема модернизированной модели ФСЭС приведена на рисунке 1а.

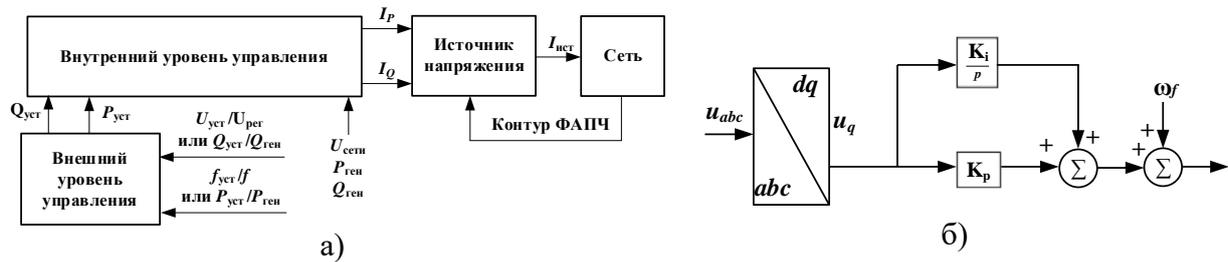


Рисунок 1 – Структурные схемы: а) модернизированной обобщенной модели ФСЭС; б) блока ФАПЧ

Для повышения численной устойчивости решения используется источник напряжения за сопротивлением, представление которого реализуется с помощью эквивалентной схемы Нортон. Однако при использовании схемы Нортон может возникнуть ситуация, когда формируемая источником величина инъекции тока в сеть превышает допустимое значение, заданное в системе управления, что приводит к ошибке процедуры интегрирования. Устранение данной проблемы осуществляется путём использования небольшой временной задержки в виде аperiодического звена первого порядка на выходе. Для возможности воспроизведения колебательных процессов в слабой электрической сети в модель добавляется логика функционирования ФАПЧ, заключающаяся в определении угла вектора напряжения источника через частоту (рисунок 1б). Реализация динамики КУТ осуществляется с помощью аperiодического звена первого порядка.

Отмечено, что при моделировании традиционных энергосистем ориентируются на временную шкалу электромеханических переходных процессов (от нескольких миллисекунд до минут), в то время как в современных ЭЭС временная шкала работы СИ и их систем управления, определяющих в целом переходный процесс для ФСЭС, находится уже в диапазоне от нескольких микросекунд и охватывает уже высокочастотные процессы, которые при традиционном численном подходе к моделированию не воспроизводятся. Поэтому более предпочтительными для моделирования ЭЭС с ФСЭС являются средства расчета электромагнитных переходных процессов.

Отдельно в диссертационной работе представлены особенности, возникающие при использовании цифровых ПВК и ПАК для расчёта электромагнитных переходных процессов в ЭЭС с СИ. В первом случае происходит значительное увеличение времени расчета при увеличении количества силовой преобразовательной техники в рассматриваемой модели, а во втором возникает необходимость разделения модели на фрагменты с разными шагами расчета, во введении фиктивных линий и трансформаторов связи для обеспечения взаимодействия между фрагментами схемы, а также в ограничении возможной пропускной способности вычислительных модулей. В связи с этим для комплексного решения проблемы детального моделирования ФСЭС в составе ЭЭС предлагается создание и применение средств, воспроизводящих единый

непрерывный спектр квазиустановившихся и переходных процессов в ФЭС на неограниченном интервале в реальном времени. Для детального воспроизведения остальной части ЭЭС, с такой же детальностью как ФЭС, предлагается использовать ВМК РВ ЭЭС.

Во второй главе обозначено, что наиболее перспективной и эффективной как в отечественной, так и в мировой энергетике является ФЭС состоящая из: а) набора фотоэлектрических модулей (ФЭМ), которые состоят из фотоэлектрических солнечных элементов (ФЭ) (солнечных ячеек); б) повышающего преобразователя постоянного тока (ПППТ) (DC/DC преобразователь); в) цепи постоянного тока (ЦПТ); г) СИ, функционирующего на базе СПН; д) системы автоматического управления и регулирования; е) реактора (Р); ж) фильтра высших гармоник (ФВГ); з) трансформатора (Т). Структурная схема ФЭС приведена на рисунке 2.

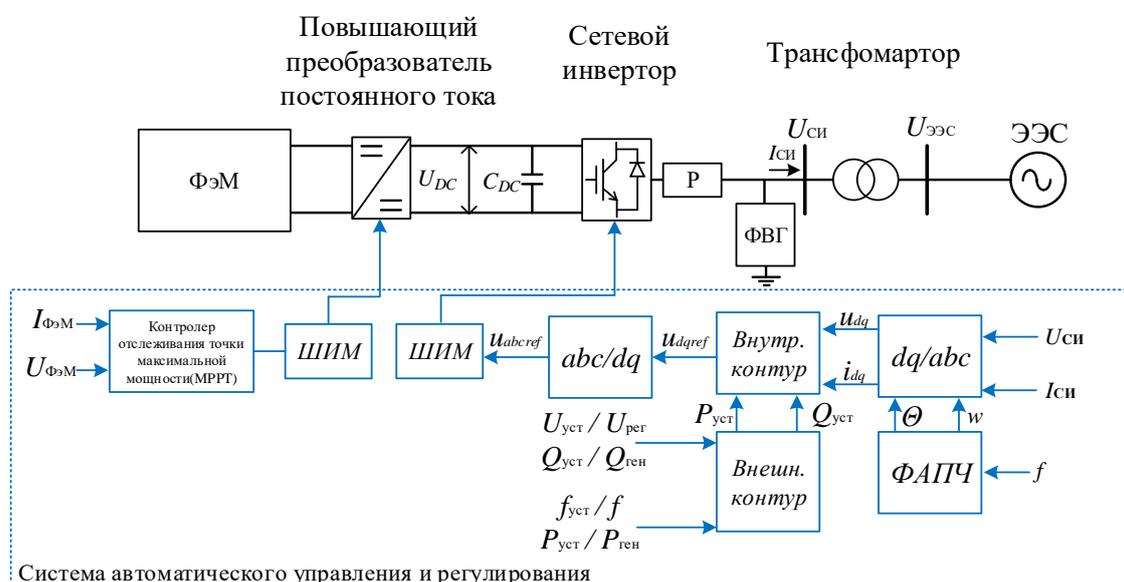


Рисунок 2 – Структурная схема ФЭС

На основании приведённой конфигурации ФЭС сформулированы основные положения концепции всережимного моделирования ФЭС:

1. Для оборудования ФЭС, которое не содержит коммутационные элементы, синтезируются всережимные математические модели, воспроизводящие единый непрерывный спектр квазиустановившихся и переходных процессов при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах его работы.

2. Для решения систем дифференциальных уравнений моделируемого оборудования ФЭС (ЦПТ, Р, ФВГ, Т) используется способ методически точного непрерывного неявного интегрирования в режиме реального времени, для реализации которого разрабатываются и используются цифро-аналоговые структуры – гибридные сопроцессоры (ГСП).

3. Для воспроизведения коммутаций силовых полупроводниковых ключей и спектра всевозможных процессов в ПППТ и СИ разрабатываются цифруправляемые физические модели (ФМ) ПППТ и СИ, которые базируются на цифруправляемых аналоговых ключах (ЦУАК).

4. Используется цифруправляемая ФМ продольно-поперечного коммутатора (ППК) на базе ЦУАК, обеспечивающая воспроизведение в детальной модели ФСЭС всевозможных поперечных и продольных коммутаций.

5. Взаимодействие СГП ФСЭС с другим моделируемым оборудованием реализовано с помощью модельного физического уровня. Мгновенные значения напряжений, представленные в виде непрерывных математических переменных выходных и входных токов, цифро-аналоговых структур, которые предназначены для решения систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования отдельных элементов ФСЭС, трансформируются с помощью преобразования напряжение-ток (ПНТ) в соответствующие им модельные физические токи, в результате чего взаимодействие этих структур с ФМ СИ, ПППТ и ППК, а также моделируемого ФСЭС в аналогично моделируемых ЭЭС происходит на модельном физическом уровне.

6. Управление параметрами (коэффициентами) математически моделируемого оборудования ФСЭС, состоянием ЦУАК, системы автоматического управления и защиты, модели ФЭМ, отображение и преобразование информации осуществляется с помощью цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования.

Согласно конфигурации ФСЭС, а также общим положениям концепции всережимного моделирования разработана структура средств её реализации, образующая СГП для детального всережимного моделирования ФСЭС в составе ЭЭС, структурная схема которого представлена на рисунке 3. В разработанном СГП ФСЭС

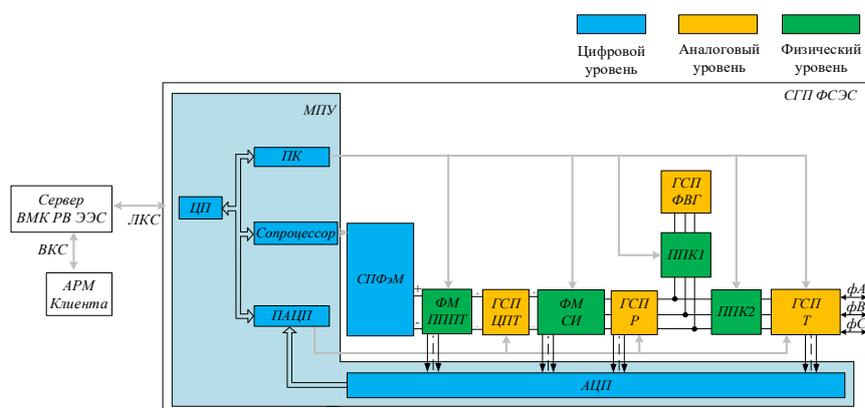


Рисунок 3 – Структурная схема СГП ФСЭС, где СП – сопроцессор, ЦП – центральный процессор, ПК – процессор коммутации, ПАЦП – процессор аналого-цифрового преобразования

на аналоговом уровне выполняется решение дифференциальных уравнений различных элементов и оборудования ФСЭС с помощью метода непрерывного неявного интегрирования на базе операционных

усилителей. В микропроцессорном узле (МПУ) на цифровом уровне

реализуются различные системы управления и защиты, а также осуществляются все необходимые информационно-управляющие функции, которые заключаются в задании параметров оборудования, обработке и передаче информации пользователю через локальную (ЛКС) и внешнюю компьютерную сеть (ВКС). Ввиду отсутствия надёжного математического описания коммутационных процессов, наиболее эффективным методом их воспроизведения является модельный физический уровень, который обеспечивается применением ЦУАК. Поэтому на физическом уровне осуществляется воспроизведение ПППТ и СИ.

В третьей главе представлены результаты реализации и тестирования элементов СГП ФСЭС, а именно: гибридных сопроцессоров оборудования ЦПТ, Р, ФВГ и Т; цифруправляемых физических моделей ПППТ и СИ; микропроцессорного узла, состоящего из ЦП и периферийных микроконтроллеров.

В состав СГП ФСЭС входит Р, схема замещения которого и описывающее её уравнение приведены на рисунке 4. Для воспроизведения Р разработан ГСП Р, структурная схема которого приведена на рисунке 5. Аналогичным образом с помощью соответствующих ГСП воспроизводятся ЦПТ, ФВГ и Т, входящие в состав ФСЭС.

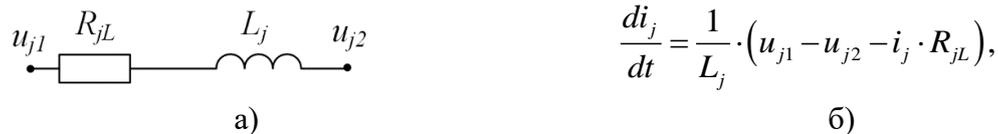


Рисунок 4 – Схема замещения (а) и система уравнений математической модели  $j$ -ой фазы реактора (б), где  $u_{j1}$  и  $u_{j2}$  – напряжения на входе/выходе  $j$ -ой фазы Р;  $i_j$  – ток  $j$ -ой фазы Р;  $R_{jL}$  и  $L_j$  – активное сопротивление и индуктивность  $j$ -ой фазы Р

Тестовые исследования ГСП Р, а также других ГСП, с учетом сложности их математических моделей, реализующих эти модели структурных схем и их

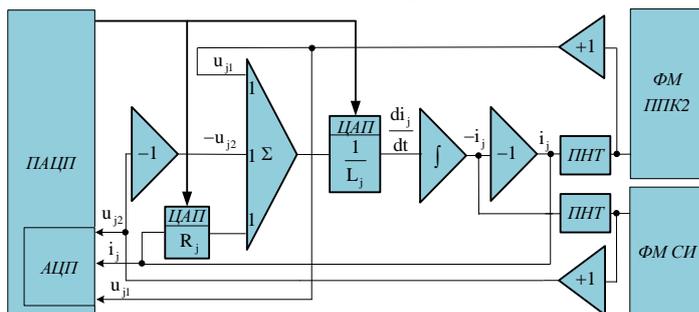


Рисунок 5 – Структурная схема ГСП Р

функционально-элементного состава, выполнены с помощью программы Multisim. Полученные осциллограммы воспроизведения напряжения и тока  $j$ -ой фазы Р, представленные на рисунке 6, имеют синусоидальную форму и ток отстает от сигнала напряжения на угол приблизительно равный 90

градусов, что соответствует функционированию реального Р. На основании полученных результатов сделан вывод об адекватности разработанных средств.

Для проверки функционирования СГП ФСЭС в целом была подготовлена схема, воспроизводящая двухмашинную тестовую

энергосистему (рисунок 7). Сравнение выполнялось с ПАК RTDS, предназначенного для моделирования ЭЭС в режиме реального времени, в котором также была реализована аналогичная топология ЭЭС.

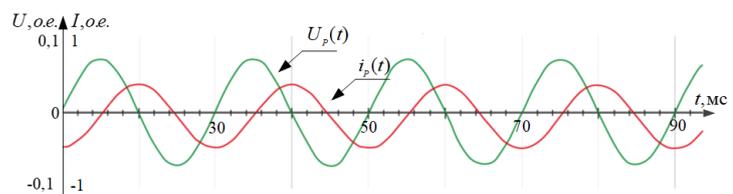


Рисунок 6 – Осциллограммы напряжения и тока ГСП Р  $j$ -ой фазы

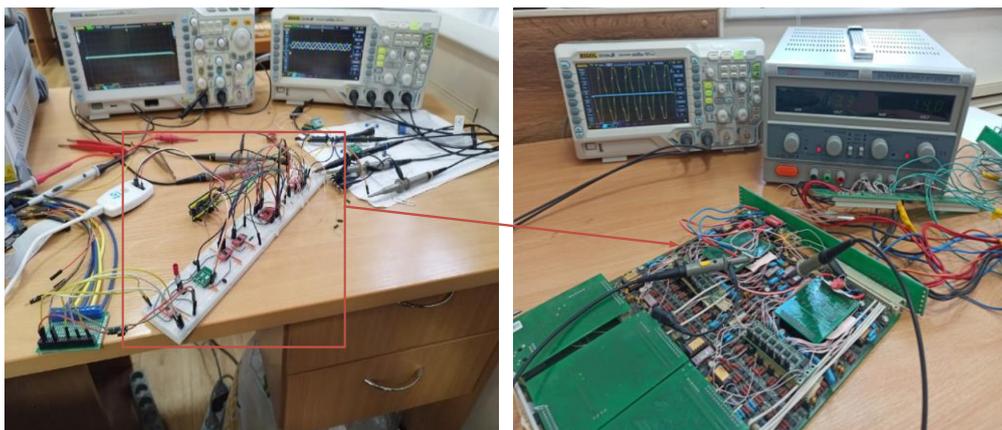


Рисунок 7 – Внешний вид СГП ФЭС в составе тестовой схемы

Сравнения выполнялись при различных возмущениях: изменение выдаваемой мощности ФЭС из-за изменения солнечной инсоляции; однофазное КЗ; двухфазное КЗ без переходного сопротивления и др.

Помимо сравнения созданных средств с моделями в ПАК, выполнено сравнение с натурными данными из открытых источников. В качестве примера были рассмотрены результаты, полученные при проведении испытаний генерирующего оборудования реальной ФЭС по подтверждению готовности к участию в общем первичном регулировании частоты. В экспериментах воспроизводилось уменьшение исходной активной мощности на различную величину при повышении частоты сети, которая формировалась путём искусственного прибавления необходимых значений к измеряемой величине. В итоге, проведенная оценка результатов моделирования в сравнении с натурными испытаниями ФЭС показала высокую степень достоверности воспроизведения процессов с помощью СГП ФЭС (рисунок 8).

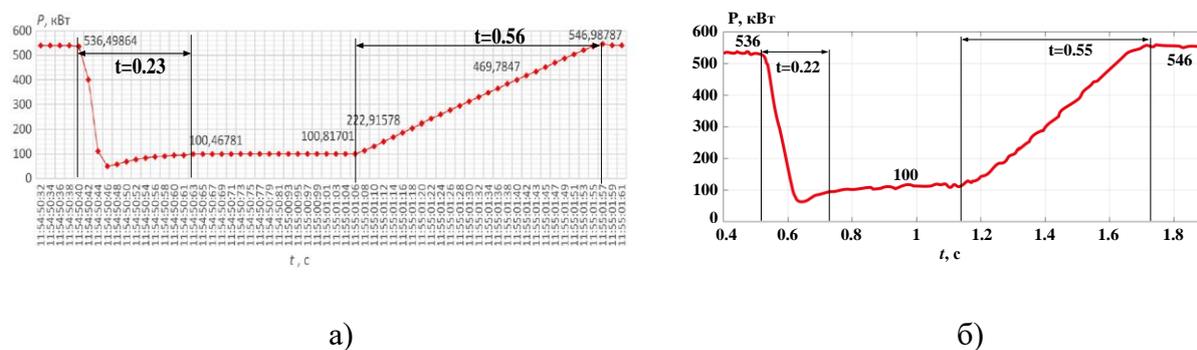


Рисунок 8 – Осциллограммы активной мощности при увеличении измеряемой частоты сети: а) реальной ФЭС; б) СГП ФЭС

**В четвертой главе** для подтверждения свойств и возможностей разработанного экспериментального образца СГП ФЭС, а также его корректного функционирования в составе ВМК РВ ЭЭС проведен комплекс испытаний в составе тестовой ЭЭС (ТЭЭС), разработанной на основе состава и топологии реальной энергосистемы. Модель ТЭЭС включает в себя 202 трехфазных узла, 50 электрических машин, 60 трансформаторов, 114 линий электропередачи и 75 нагрузок. Интеграция ФЭС осуществлялась в удаленный дефицитный энергорайон 110 кВ, в котором в результате внедрения ФЭС

соответствующим образом изменяется плотность электрической сети. Рассмотрены два основных случая: подключение ФЭС к сильной ( $OKЗ=4,23$ ,  $P_{ФЭС}=16$  МВт) и слабой ( $OKЗ=1,99$ ,  $P_{ФЭС}=32$  МВт) электрической сети. Выполненные исследования разделены на два направления:

1. Верификация модернизированной обобщенной модели ФЭС.

В настоящее время основным подходом к получению информации о режимах и процессах в ФЭС, функционирующих в составе реальных ЭЭС, является использование модернизированной обобщенной модели ФЭС в ПВК для расчёта электромеханических переходных процессов. Однако, как отмечено ранее, такая модель имеет ряд упрощений и ограничений. В связи с этим необходимо определить области наиболее и наименее эффективного использования различных модификаций обобщенных математических моделей ФЭС при различных по интенсивности, месту возникновения и типу возмущений для ЭЭС реальной размерности. Заложенные при разработке принципы построения СПП ФЭС дают возможность изменять его структуру, что позволяет не только выполнить с помощью него верификацию обобщенной модернизированной модели, но и выявить конкретные причины возникновения погрешностей за счёт исключения различных элементов и контуров в составе СПП ФЭС. Использование СПП ФЭС в качестве модельного эталона обосновывается тем, что все основные элементы и СПП ФЭС в целом были всесторонне испытаны, а также выполнены сравнения с широко апробированным ПАК RTDS и натурными данными, что гарантирует получение достоверной информации с помощью СПП ФЭС в составе ЭЭС ввиду сохранения всех его свойств и возможностей вне зависимости от масштаба рассматриваемой схемы ЭЭС и характера оцениваемого процесса. Достоверность результатов для ТЭЭС, получаемых с помощью ВМК РВ ЭЭС, доказана различными исследованиями и сравнениями с натурными данными. В рамках первого направления рассмотрены следующие сценарии:

- 1) изменение мощности, выдаваемой ФЭС, и наброс нагрузки в точке подключения ФЭС;
  - 2) плавное увеличение мощности ФЭС;
  - 3) близкое и удалённое относительно ФЭС трёхфазное КЗ;
  - 4) длительное трёхфазное КЗ для оценки определения с помощью модернизированной обобщенной модели предельного времени отключения КЗ;
  - 5) изменение сопротивления связи между ФЭС и точкой подключения.
2. Возможность воспроизведения колебаний режимных параметров при функционировании ФЭС в слабых сетях и реализация возможных средств их демпфирования.

Как было отмечено, данный район может приобретать свойства слабой электрической сети при определенных топологиях и уровне генерации ФЭС. Соответственно в таких районах возможно возникновение незатухающих колебаний согласно представленному анализу. Поэтому рассмотрение ФЭС в данном районе актуально и практически значимо. Также данное направление исследований позволяет экспериментально доказать необходимость использования детальной математической модели ФЭС в составе ЭЭС для полного и достоверного воспроизведения колебаний

режимных параметров в условиях слабой электрической сети, а также влияющие на данные колебания факторы. В рамках второго направления рассмотрены сценарии, идея которых заключается в рассмотрении способов варьирования ОКЗ сети за счёт изменения топологии электрической сети и выдаваемой мощности ФСЭС.

Проведенные в рамках первого направления исследования показали, что модернизированная обобщенная модель ФСЭС в целом с высокой достоверностью воспроизводит различные малые возмущения для любой конфигурации сети. При воспроизведении различных КЗ на достоверность результатов моделирования оказывают влияние место возмущения, интенсивность и плотность сети. В результатах, полученных с помощью СГП ФСЭС, после ликвидации КЗ наблюдается всплеск активной мощности, который обусловлен процессом разряда конденсатора ЦПТ. При моделировании с помощью модернизированной обобщенной модели ФСЭС динамика ЦПТ не воспроизводится. Исключение ЦПТ в СГП ФСЭС, всех ее звеньев и каналов управления, приводит к значительно лучшему совпадению результатов моделирования (рисунок 9). Однако исключение динамики ЦПТ в СГП ФСЭС при удаленном КЗ не привело к такому значительному снижению уровня погрешности как при близком КЗ. Такой характер изменения погрешности обусловлен существенным влиянием переходных процессов внешней сети на энергорайон, где расположена ФСЭС, при удаленном КЗ. Несмотря на это, в целом модернизированная обобщенная модель показывает удовлетворительный отклик при любом КЗ в случае установки ФСЭС в сильной электрической сети.

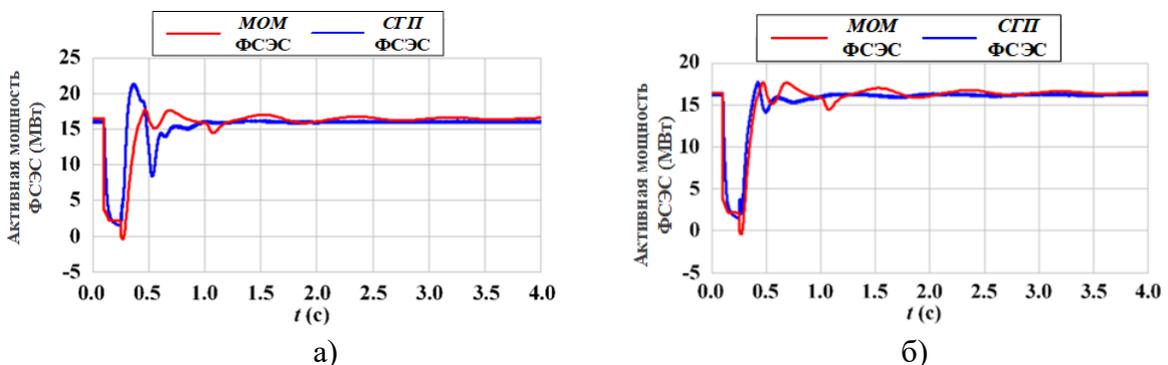


Рисунок 9 – Осциллограммы переходных процессов при близком КЗ длительностью 150 мс ( $OKЗ = 4,23$ ): а) СГП ФСЭС с ЦПТ; б) СГП ФСЭС без ЦПТ, где МОМ – модернизированная обобщенная модель

При низком ОКЗ в результатах моделирования аналогичных КЗ с помощью модернизированной обобщенной модели формируется большая погрешность по сравнению с предыдущим случаем. Величина погрешности также зависит от динамики ЦПТ. При ее исключении погрешность снижается, но все равно остается большей по сравнению со случаем сильной сети. На полученных осциллограммах активной мощности имеется ярко выраженный «провал» при снятии КЗ (рисунок 10), который является нереалистичным. Он обусловлен тем, что при численном воспроизведении только электромеханических переходных процессов не воспроизводится быстрая

динамика системы управления и при мгновенном изменении напряжения САУ СИ в модернизированной обобщенной модели не успевают изменить выдаваемый ток, чтобы

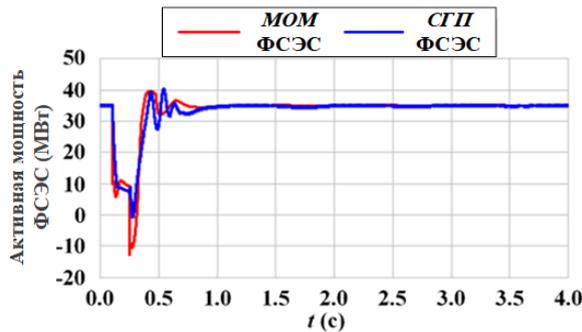


Рисунок 10 – Активная мощность ФЭС при близком КЗ длительностью 150 мс в случае  $ОКЗ = 1,99$

получить желаемую величину мощности. Таким образом, увеличенная величина погрешности в слабой электрической сети связана с тем, что в отличие от сильной электрической сети преобладающее влияние на полноту и достоверность результатов моделирования оказывает динамика системы управления СИ ФЭС. Несмотря на добавление в обобщенную модель ФАПЧ, быстрые контуры управления остаются упрощенными и не воспроизводят динамику функционирования САУ полностью. Также спектр процессов, на которые реагирует ФАПЧ, ограничен при численном моделировании по сравнению с детальным моделированием с помощью СГП ФЭС. В результате, чем более настройка системы управления ориентирована на получение быстрой реакции СИ, тем больше будет погрешность моделирования вплоть до радикальных различий. В эксперименте с увеличением мощности ФЭС вместо фиксированных значений ОКЗ, как в предыдущих исследованиях, рассматривается его плавное уменьшение за счёт увеличения уставки по мощности ФЭС (рисунок 11), что приводит к трансформации сильной электрической сети в ультраслабую (от  $ОКЗ = 4,23$  до  $ОКЗ = 1,75$ ). В ходе выполнения описанного сценария было выявлено, что увеличение установленной мощности ФЭС при использовании модернизированной обобщенной модели оказывается практически безграничным и не приводит к нарушению устойчивости, в то время как при использовании СГП ФЭС наблюдается обратная ситуация – возникают

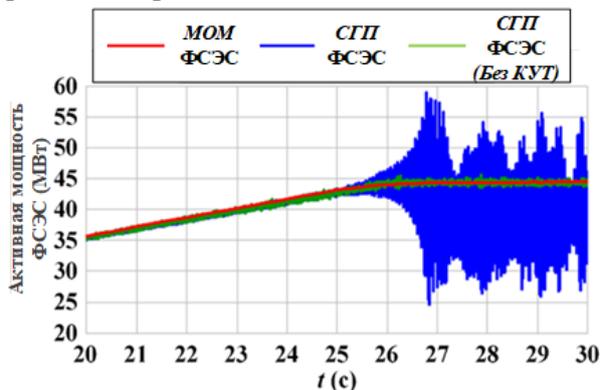


Рисунок 11 – Осциллограммы переходных процессов при интеграции ФЭС с увеличением установленной мощности

незатухающие колебания с частотой около 13 Гц и увеличивающейся амплитудой. Наблюдаемые колебания связаны с динамикой функционирования быстрых контуров управления СИ, причем обоих ФАПЧ и КУТ. Поскольку если в детальной модели исключить КУТ, то колебания исчезают, и система остается устойчивой (зеленая кривая на рисунке 11). Таким образом добавление в обобщенную модель только ФАПЧ не всегда позволяет воспроизвести колебательный характер объекта ФЭС в случае слабой электрической сети.

Быстродействующий КУТ также играет важную роль, его отсутствие в обобщенной модели и соответственно игнорирование динамики его взаимодействия с ФАПЧ

приводит к радикальной разнице в результатах моделирования. Разумеется, что не сам КУТ приводит к колебаниям, а его не подходящая настройка к сформированному ОКЗ электрической сети.

Таким образом, на основании полученных результатов выявлено, что возникающие в ЭЭС со слабыми электрическими сетями субсинхронные колебания связаны с динамикой функционирования быстрых контуров управления СИ ФЭС. Причём поскольку КУТ имеет, как правило, фиксированную настройку, зависящую от частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ), то настройка ФАПЧ может изменяться в довольно широких пределах и связана с необходимой скоростью измерения частоты сети для синхронизации. В связи с этим в рамках второго направления исследований рассмотрены различные полосы пропускания ФАПЧ: а) ФАПЧ1 = 5 Гц; б) ФАПЧ2 = 15 Гц; в) ФАПЧ3 = 30 Гц; г) ФАПЧ4 = 50 Гц. Из представленных осциллограмм на рисунке 12 видно, что отключение ЛЭП и как следствие уменьшение ОКЗ энергорайона приводит к возникновению незатухающих колебаний мощности разной частоты в зависимости от полосы пропускания ФАПЧ. С помощью выполненного анализа гармонического спектра для активной мощности (рисунок 13) выявлено, что при росте полосы пропускания ФАПЧ увеличивается доминирующая частота колебаний, также прослеживается тенденция по снижению её амплитуды. Аналогичный характер колебаний получен при воспроизведении процессов, возникающих при увеличении солнечной инсоляции.

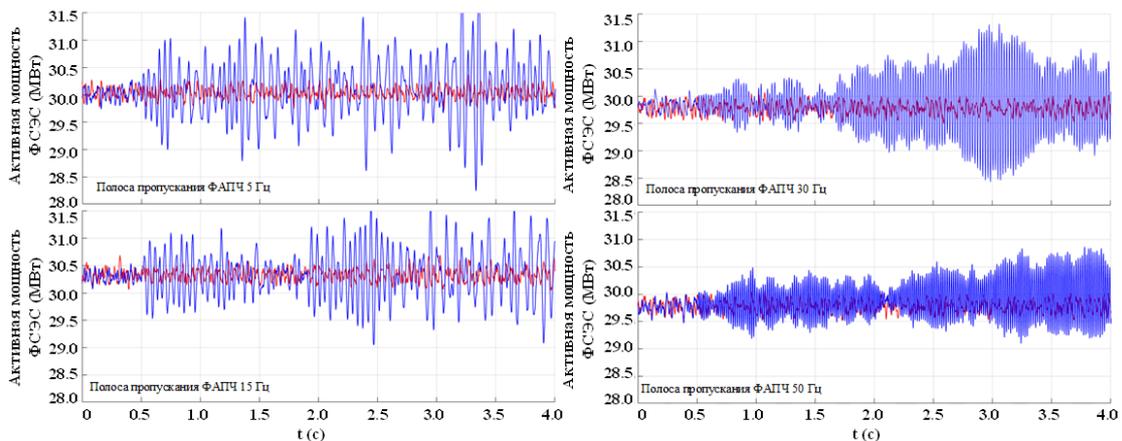


Рисунок 12 – Осциллограммы активной мощности ФЭС при отключении ЛЭП и разной полосе пропускания ФАПЧ, где синяя кривая – ФЭС без дополнительного субсинхронного демпфирующего управления (ДСДУ), красная кривая – ФЭС с ДСДУ

В результате выполненные эксперименты подтвердили, что разработанный СГП ФЭС позволяет воспроизводить субсинхронные колебания режимных параметров различной частоты и амплитуды при изменении основных, влияющих на них факторов: настройка блока ФАПЧ и изменение ОКЗ электрической сети. В связи с этим СГП ФЭС может использоваться для разработки мероприятий по демпфированию таких колебаний.

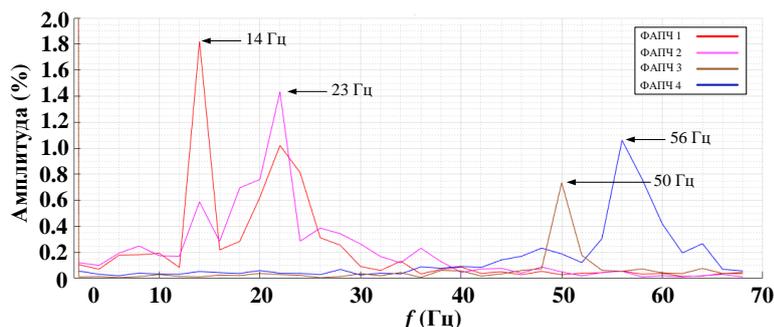


Рисунок 13 – Гармонический спектр мощности ФЭС при разных полосах пропускания блока ФАПЧ в случае отключения ЛЭП

Одним из перспективных подходов по демпфированию колебаний является модернизация САУ СИ ФЭС за счёт интеграции различных регуляторов демпфирования колебаний. В работе рассмотрено применение ДСДУ, изображенного на рисунке 14. В рамках экспериментальных

исследований выполнено моделирование аналогичных вышеизложенным возмущений, но с учётом интегрированных в СГП ФЭС ДСДУ. Результаты, представленные на рисунке 12 (красным цветом), демонстрируют эффективное демпфирование колебаний при различных возмущениях в ЭЭС за счёт использования ДСДУ. В итоге доказана возможность использования разработанного СГП ФЭС для анализа способов и подходов по демпфированию субсинхронных колебаний в ЭЭС.

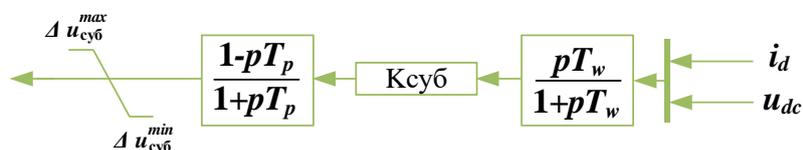


Рисунок 14 – Структурная схема регулятора ДСДУ

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Представлен анализ особенностей ФЭС, которые заключаются в отсутствие прямого сопряжения с сетью и использования для подключения к электрической сети СИ. В результате внедрения таких ФЭС существенно изменяются динамические свойства ЭЭС из-за отличающийся динамики функционирования СИ и его системы управления, что может приводить к проблемам, связанным с возникновением колебаний различной частоты и амплитуды. Отмечено, что особенно часто возникают обозначенные проблемы при внедрении ФЭС в ЭЭС со слабыми электрическими сетями. Плотность такой электрической сети оценивается с помощью коэффициента ОКЗ. Основным способом анализа возникающих проблем, связанных с внедрением ФЭС в ЭЭС, является математическое моделирование.

2. Рассмотрены используемые виды обобщенных моделей ФЭС и их модификации. Выделены особенности модернизированных моделей: а) ФЭС представляется в виде источника напряжения вместо источника тока; б) для синхронизации с сетью добавлен контур ФАПЧ; в) КУТ аппроксимируется апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени от 10 до 20 мс; г) ЦПТ и её система САУ не воспроизводятся; д) динамика первичного источника энергии не воспроизводится.

3. Рассмотрены подходы к моделированию ЭЭС с ФЭС с помощью ПВК и

ПАК. Отмечается, что при моделировании современных ЭЭС временная шкала работы СИ и их систем управления, определяющих в целом переходный процесс для ФСЭС, находится в диапазоне от нескольких микросекунд и охватывает высокочастотные процессы, которые при традиционном численном подходе к моделированию не воспроизводятся. Поэтому более предпочтительными для моделирования ЭЭС с ФСЭС являются средства расчета электромагнитных переходных процессов. Отдельно представлены особенности, возникающие при использовании цифровых ПВК и ПАК для моделирования ЭЭС с СИ.

4. Предложено использовать всережимный подход к моделированию, который заключается в комплексном применении сразу нескольких методов моделирования: аналогового, цифрового и физического, ввиду присущих особенностей только цифровому математическому моделированию при анализе и исследовании процессов в больших ЭЭС с ФСЭС. Реализацией данного подхода является уникальное, отечественное средство моделирование – ВМК РВ ЭЭС. В рамках всережимного подхода, а также на основе анализа специфики функционирования ФСЭС в ЭЭС сформулированы конкретные положения концепции её всережимного моделирования в реальном времени. На основании концепции реализован СГП ФСЭС.

5. Выполнено сравнение результатов моделирования, получаемых с помощью СГП ФСЭС на примере двухмашинной схемы, с аналогичными результатами, полученными с помощью ПАК RTDS. Также выполнено сравнение с натурными данными из открытых источников. Во всех экспериментах продемонстрировано совпадение результатов, что доказывает корректность функционирования разработанного СГП ФСЭС.

6. Для подтверждения свойств и возможностей СГП ФСЭС в составе ВМК РВ ЭЭС проведен комплекс испытаний в модели энергосистемы, разработанной на основе топологии реальной ЭЭС. Сформулированы и выполнены два направления исследований: а) верификация модернизированной обобщенной модели ФСЭС; б) оценка возможности воспроизведения колебаний режимных параметров при функционировании ФСЭС в слабых сетях с помощью СГП ФСЭС.

7. В рамках первого направления доказано, что модернизированная обобщенная модель ФСЭС: а) с высокой достоверностью воспроизводит различные малые возмущения для любой конфигурации сети; б) демонстрирует удовлетворительный отклик при любом КЗ в случае сильной сети, в слабой сети формируется существенно большая погрешность; в) при близком КЗ демонстрирует погрешность преимущественно связанную с исключением динамики ЦПТ; г) не позволяет воспроизвести неустойчивость, обусловленную функционированием СИ в слабой сети, из-за упрощенной динамики функционирования САУ СИ. Таким образом доказана возможность использования разработанного СГП ФСЭС для верификации обобщённых математических моделей ФСЭС в составе ЭЭС.

8. В рамках второго направления экспериментально доказано, что с помощью разработанного СГП ФСЭС могут быть воспроизведены субсинхронные колебания режимных параметров различной частоты и амплитуды при изменении основных, влияющих на них факторов: настройка блока ФАПЧ и изменение плотности

электрической сети. Также возможна модернизация САУ СИ в СГП ФЭС путём интеграции различных регуляторов, что позволяет разрабатывать мероприятия по эффективному демпфированию такого рода колебаний.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. **Рудник В.Е.** Исследование функционирования алгоритма синтетической инерции в электроэнергетических системах разной плотности / В.Е. Рудник, А.А. Суворов, Н.Ю. Рубан, М.В. Андреев, Ю.Д. Бай // *iPolytech Journal*. – 2022. – Т. 26. – № 3. – С. 465-486.
2. **Рудник В.Е.** Верификация численных расчётов электромеханических переходных процессов при оценке устойчивости электроэнергетических систем с генерирующими объектами, использующими ВИЭ / А.А. Суворов, А.Б. Аскарлов, В.Е. Рудник, И.А. Разживин, М.В. Андреев, Ю.Д. Бай // *Электрические станции*. – 2022. – № 1. – С. 25-37.
3. **Рудник В.Е.** Синтез и тестирование типовых структур систем автоматического управления на основе виртуального синхронного генератора для генерирующих установок с силовым преобразователем. / А.А. Суворов, А.Б. Аскарлов, В.Е. Рудник, М.В. Андреев, Ю.Д. Бай // *Электрические станции*. – 2022. – № 3. – С. 43-57.
4. **Рудник В.Е.** Оценка влияния объектов солнечной генерации на устойчивость энергорайона со слабыми связями / П.И. Круглыхин, Р.А. Уфа, В.Е. Рудник, А.С. Васильев // *Интеллектуальная электротехника*. – 2022. – № 3. – С. 79-99.
5. **Рудник В.Е.** Исследование влияния синтетической инерции на динамическую устойчивость электроэнергетических систем / Разживин И.А., Суворов А.А., Андреев М.В., Рудник В.Е., Гусев А.С. // *Электричество*. – 2022. – № 8. – С. 16-26.
6. **Рудник В.Е.** Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах / Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскарлов, М.В. Андреев, А.В. Киевец, В.Е. Рудник // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2020. – № 36. – С. 7-30.

#### Публикации в изданиях, входящих в реферативные базы Scopus и Web of Science:

1. **Rudnik V.E.** Frequency control by the PV station in electric power systems with hydrogen energy storage / N. Ruban, V. Rudnik, A. Askarov, B. Maliuta // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48. – PP. 28262–28276.
2. **Rudnik V.E.** A novel approach to validation of a positive-sequence modeling of a converter-interfaced generation with hydrogen energy storage in practical power systems / A. Suvorov, A. Askarov, V. Rudnik, I. Razzhivin, M. Andreev // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48. – PP. 4529–4542.

3. **Rudnik V.E.** Application of generating units based on renewable energy sources for damping oscillations in the power system / R. Ufa, V. Rudnik, Y. Sarsikev, Y. Malkova, G. Ansabekova // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9. – PP. 302-311.
4. **Rudnik V.E.** Study of algorithm synthetic inertia functioning in electric networks of different density / V.E. Rudnik, A.A. Suvorov, I.A. Razzhivin, N.Yu. Ruban, M.V. Andreev // Eurasian Physical Technical Journal. – 2022. – Vol. 19(2). – PP. 75–85.
5. **Rudnik V.E.** Damping of low-frequency oscillation using renewable generation units / R. Ufa, V. Rudnik, F. Deng // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9. – PP. 25-31.
6. **Rudnik V.E.** A Hybrid Model of Photovoltaic Power Stations for Modelling Tasks of Large Power Systems / N. Ruban, V. Rudnik, I. Razzhivin, A. Kievec // EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica. – 2021. – Vol. 69. – PP. 43–49.

#### **Публикации в сборниках статей и трудах конференций:**

1. **Рудник В.Е.** Анализ влияния настроек систем управления силовых преобразователей фотоэлектрических электростанций на маневренные характеристики энергосистемы / Р.В. Мицкевич, Н.Ю. Рубан, В.Е. Рудник, Ю.Д. Бай // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы V Международной научно-технической конференции. Чебоксары. – 2021. – С. 240-246.
2. **Рудник В.Е.** Исследование проблемы математического моделирования режимов и процессов в электроэнергетических системах с солнечными электростанциями на основе обобщенных моделей / В.Е. Рудник, А.А. Суворов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы 95-го заседания Международного научного семинара. Иркутск. – 2023. – С. 319-328.

#### **Патент:**

1. Патент № 2785362 С1, H02S 99/00. Устройство для моделирования солнечной электростанции в энергетической системе. Заявка № 2022123985 от 09.09.2022. Дата публикации: 06.12.2022 / **В.Е. Рудник**, Р.А. Уфа, А.А. Суворов, А.Б. Аскарлов, А.В. Киевец, М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан, И.А. Разживин, Ю.Д. Бай // Дата публикации: 06.12.2022, заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

#### **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660394. Специализированный программный пользовательский клиент гибридных моделирующих комплексов. Заявка № 2020619564 / А.А. Суворов, **В.Е. Рудник**, А.Б. Аскарлов, А.В. Киевец // Дата публикации: 03.09.2020, заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».