

ОТЗЫВ

официального оппонента – доктора технических наук
Илюшина Павла Владимировича на диссертационную работу
Рудника Владимира Евгеньевича на тему «**Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе**»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – «Электроэнергетика»

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В настоящее время во многих странах мира и России реализуется тренд, направленный на декарбонизацию электроэнергетики. Он проявляется в виде массовой интеграции в энергосистемы низкоуглеродных генерирующих установок, работающих на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В отчете Международного энергетического агентства за 2022 г. отмечается прирост суммарной установленной мощности фотоэлектрических солнечных электростанций (ФСЭС), которые превысили суммарную мощность ветровых электростанций. Одной из основных причин этого стало существенное удешевление технологий производства фотоэлектрических модулей. Важной особенностью ФСЭС является их интеграция в энергосистемы через сетевые инверторы. Массовое внедрение ФСЭС с инверторами, функционирующих, как правило, на базе статических преобразователей напряжения, принципиально изменяет динамические свойства энергосистем, что обусловлено режимами работы инверторов и их систем автоматического управления. При этом в энергосистемах увеличивается скорость протекания переходных процессов из-за уменьшения эквивалентной постоянной инерции, что может служить причиной неправильной работы устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики. Перечисленные особенности приводят к существенному влиянию ФСЭС с инверторами на характер и параметры переходных процессов в энергосистемах. Особенно остро эти проблемы проявляются в случаях, когда ФСЭС интегрируются в энергорайоны со слабыми электрическими связями. В таких энергорайонах в последнее время в различных странах мира фиксируются незатухающие колебания параметров режима, приводящие к нарушению устойчивости, что также оказывает влияние на функционирование энергосистем. Для решения указанных проблем необходимо проведение детального анализа переходных процессов в энергосистемах с ФСЭС, а для этого требуется достоверная информация, которую можно получить посредством моделирования электрических режимов в различных схемно-режимных ситуаций. Учитывая изложенное, актуальность выбранной соискателем тематики диссертационного исследования не вызывает сомнений.

Анализ достижений российских и зарубежных ученых в рассматриваемой научной области позволил соискателю сформулировать цель и выполнить постановку задач для своего диссертационного исследования.

Целью работы является разработка концепции и средств её реализации для всережимного моделирования ФСЭС в составе энергосистемы.

Объектом исследования является детальная модель ФСЭС, подключаемая к электрической сети с помощью сетевого инвертора.

Предметом исследования являются переходные процессы в ФСЭС, функционирующей в составе энергосистемы.

2. НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Научная новизна диссертационной работы Рудника В.Е. не вызывает сомнений и заключается в следующем:

- разработан и реализован специализированный гибридный процессор ФСЭС, в котором предполагается использование физических моделей для повышающего преобразователя постоянного тока и статического преобразователя напряжения, что позволяет полно и достоверно воспроизводить динамику цепи постоянного тока и функционирование быстродействующих систем управления ФСЭС: блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и внутреннего контура управления током;

- доказано, что модернизация обобщенной математической модели ФСЭС путём добавления только блока ФАПЧ является недостаточной для полного и достоверного воспроизведения колебаний режимных параметров различной частоты, возникающих по различным причинам при функционировании ФСЭС в слабых электрических сетях. Необходимым в данном случае является учёт в обобщенной математической модели ФСЭС всей структуры внутреннего контура управления током.

Основные результаты работы, связанные с анализом, выявлением и обоснованием проблемы с полнотой и достоверностью известных моделей ФСЭС в составе энергосистемы, направлений её решения и создания специализированного гибридного процессора ФСЭС, позволяющего выполнять всережимное моделирование ФСЭС в реальном времени и на неограниченном интервале, и экспериментальных средств в целом, а также проведение с их помощью экспериментальных исследований, подтверждающих определяемые концепцией свойства и возможности, получены соискателем лично. Постановка решаемых в диссертации задач, планирование экспериментов и подготовка научных публикаций проводились совместно с научным руководителем.

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполнена модернизация созданного в научно-исследовательской

лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» Томского политехнического университета – Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) за счет разработки программно-аппаратных средств гибридного моделирования ФСЭС. Разработанные средства всережимного моделирования ФСЭС позволяют получать полную и достоверную информацию о режимах работы, характере и параметрах переходных процессов ФСЭС, функционирующих в составе энергосистемы в различных режимах работы. Это требуется для обеспечения надежного и эффективного решения актуальных для электроэнергетики задач проектирования, исследования и эксплуатации, особенно тех, которые связаны с воспроизведением колебаний режимных параметров различной частоты при работе ФСЭС в слабых сетях, в зависимости от схемно-режимных ситуаций.

Диссертационная работа Рудника В.Е. имеет конкретную практическую направленность, так как ее результаты могут использоваться в дальнейшем и уже использовались при реализации нескольких проектов Российского научного фонда №18-79-10006, №21-79-00129, №21-79-00275.

4. ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ВЫВОДОВ, ПОЛОЖЕНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИЙ

Достоверность полученных в диссертационной работе Рудника В.Е. результатов подтверждается корректным использованием основных положений теории математического моделирования, надежности и устойчивости электроэнергетических систем, корректностью поставленных задач, анализом и сопоставлением полученных результатов с данными, опубликованными другими отечественными и зарубежными авторами.

Кроме того, при проведении экспериментальных исследований использовалось современное приборное и методическое обеспечение, в том числе ВМК РВ ЭЭС.

Представленные в диссертационной работе положения научной новизны, теоретической и практической значимости полученных результатов, выводы по главам, заключительные выводы и рекомендации являются в целом обоснованными, так как логически вытекают из полученных закономерностей и результатов экспериментальных исследований.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ О СООТВЕТСТВИИ ДИССЕРТАЦИИ УСТАНОВЛЕННЫМ КРИТЕРИЯМ

Диссертационная работа Рудника В.Е. отвечает критериям п. 2.1., п. 2.2., п. 2.3., установленным Порядком присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Указанная соискателем цель работы – разработка концепции и средств её

реализации для всережимного моделирования ФСЭС в составе энергосистемы – достигнута в рамках диссертационной работы. В целом диссертационная работа является законченной научно-квалифицированной работой, так как содержит решение научной и практической задачи, имеющей существенное значение для развития электроэнергетической отрасли страны, заключающейся в модернизации ВМК РВ ЭЭС с помощью разработанного специализированного гибридного процессора ФСЭС, позволяющего воспроизводить субсинхронные колебания режимных параметров различной частоты и амплитуды при изменении основных, влияющих на них факторов: параметры настройки блока ФАПЧ; коэффициент отношения короткого замыкания электрической сети.

Диссертационная работа написана соискателем самостоятельно, содержит новые научные результаты и положения, выносимые на публичную защиту, что свидетельствует о его личном вкладе в науку. Соискателем в составе авторского коллектива получен 1 (один) патент Российской Федерации на изобретение и 1 (одно) свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Предложенные соискателем решения аргументированы и сопоставлены с результатами экспериментальных и аналитических исследований других авторов.

По теме диссертации соискателем опубликованы 26 работ, из которых 6 в изданиях, которые входят в перечень, рекомендованный ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, а также 6 в изданиях, индексируемых базами научного цитирования Web of Science и Scopus.

В диссертационной работе Рудника В.Е. сделаны необходимые ссылки на авторов и источники заимствования материалов и отдельных результатов, приводимых в научном исследовании.

Название диссертационной работы, ее цель и задачи содержат ключевые понятия и слова из паспорта заявленной научной специальности. По тематике, объекту и области исследования, разработанные соискателем положения научной новизны, теоретической и практической значимости соответствуют научной специальности 2.4.3 – «Электроэнергетика».

6. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы (148 источников), 109 рисунков, 11 таблиц и 1 приложение.

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбора тематики диссертационного исследования, сформулированы ее цель и задачи, представлены основные положения научной новизны, теоретической и практической значимости работы, информация о внедрении и апробации полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту. Показана связь диссертационной работы с научными программами и грантами, а также выделен личный вклад соискателя.

В первой главе представлен анализ опыта интеграции и функционирования генерирующих установок на основе ВИЭ, в частности ФСЭС, в составе Единой энергетической системы России, а также энергосистем других стран. Представлен анализ особенностей ФСЭС, которые заключаются в отсутствии прямого сопряжения с сетью и использовании для подключения ФСЭС сетевого инвертора. Рассмотрены подходы к моделированию энергосистем с ФСЭС с помощью программно-вычислительных (ПВК) и программно-аппаратных (ПАК) комплексов, отмечены их особенности. Предложен всережимный подход к моделированию ФСЭС в составе энергосистем.

Во второй главе на основании приведённой конфигурации ФСЭС сформулированы основные положения концепции всережимного моделирования ФСЭС. Согласно конфигурации ФСЭС, а также общим положениям концепции всережимного моделирования, разработана структура средств её реализации, которая представлена в виде специализированного гибридного процессора ФСЭС.

В третьей главе представлены результаты реализации и тестирования элементов специализированного гибридного процессора ФСЭС, а именно: гибридных сопроцессоров оборудования цепи постоянного тока, реактора, фильтра высших гармоник, трансформатора, цифруправляемых физических моделей повышающего преобразователя постоянного тока и сетевого инвертора. Также представлены результаты проверки корректности функционирования специализированного гибридного процессора ФСЭС в целом.

В четвертой главе для подтверждения свойств и возможностей разработанного экспериментального образца специализированного гибридного процессора ФСЭС и его корректного функционирования в составе ВМК РВ ЭЭС проведен комплекс испытаний в составе тестовой энергосистемы, разработанной на основе состава оборудования и топологии реальной энергосистемы.

В заключении обобщены основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, и сформулированы основные выводы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы и отражает ее основные результаты, положения и выводы.

7. ВОПРОСЫ И ЗАМЕЧАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ ДИССЕРТАЦИИ

При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации Рудника В.Е. возникли следующие вопросы и замечания:

1. В Главе 1 (стр. 24) отмечается, что колебания режимных параметров возникают и распространяются по всей энергосистеме, при функционировании в ее составе ФСЭС. Однако, раз в диссертационном исследовании в основном рассматриваются энергорайоны со слабыми связями, то негативное влияние в основном оказывается на электроустановки, работающие в составе

энергорайонов, и в меньшей степени энергосистемы. Это обусловлено наличием нескольких ступеней трансформации, устройств компенсации реактивной мощности, протяженными ЛЭП, различными электростанциями и др.

2. В диссертации не рассмотрена возможность ввода диспетчерских схемно-режимных ограничений, с учетом текущей схемно-режимной ситуации. В филиалах АО «СО ЕЭС» это является нормальной практикой, когда в отдельных ремонтных схемах, с отключением линий электропередачи (ЛЭП) или силовых трансформаторов, вводится ограничение на величину мощности, выдаваемой конкретными электростанциями в сеть. Поэтому, при отключении какой-либо из ЛЭП, связывающих энергорайон с энергосистемой, может выдаваться диспетчерская команда на абсолютное ограничение мощности, вырабатываемой ФСЭС, с целью предотвращения возможности возникновения незатухающих или слабозатухающих колебаний параметров режима.

3. В Главе 1 (стр. 34) на рис. 1.19 рассматриваются временные диапазоны различных переходных процессов. Следует пояснить, работу каких выключателей соискатель рассматривает с быстродействием во временном диапазоне 10^{-3} - 10^{-5} с (1 мс и менее). Известно, что находящиеся в эксплуатации в энергосистемах высоковольтные выключатели имеют собственное время отключения в диапазоне 35-70 мс, что существенно больше заявленного.

4. В диссертации нет информации о том, в каких диапазонах рассматривается возможность регулирования реактивной мощности сетевыми инверторами ФСЭС. В разных странах требования к выработке реактивной мощности различны, что обуславливает необходимость установки сетевых инверторов мощностью на ступень больше, чем требуется для выдачи активной мощности. Окажет ли требование по выдаче значительной величины реактивной мощности ФСЭС существенное влияние на параметры переходных процессов?

5. В главе 3 (стр. 80) на рис. 3.32 для воспроизведения реальных режимов работы энергорайона со слабыми связями и высокой долей выработки электроэнергии ФСЭС используется двухмашинная схема. Следовало бы дополнить эту схему синхронным генератором (несколькими синхронными генераторами), работающими в составе энергорайона, иначе вся выработка на 100% осуществляется ФСЭС. Это позволило бы более точно воспроизвести электромеханические переходные процессы в анализируемом энергорайоне.

6. В главе 3 (стр. 81) неясно почему при исследовании параллельной работы ФСЭС с энергосистемой не рассматривается 3-х фазное КЗ, хотя на стр. 92 и далее оно анализируется. Кроме того, следует пояснить, почему не рассматриваются КЗ с неуспешным АПВ, КЗ с отказом одного выключателя и действием УРОВ? Указанные нормативные возмущения являются наиболее тяжелыми и требуют выполнения расчетного анализа. Следовало бы при анализе аварийных возмущений использовать требования действующих «Методических

указаний по устойчивости энергосистем», утвержденных приказом Минэнерго России от 03.08.2018 №630, которые являются обязательными при разработке схем выдачи мощности ФЭС, функционирующих в составе энергосистем.

7. В главе 4 (стр. 92) в п. 3 отмечается, что удаленное КЗ на ПС 153 является наиболее тяжелым. Обычно в энергосистемах тяжесть КЗ определяется его близостью, многофазностью и большой длительностью (ликвидируются с выдержкой времени). В энергорайонах со слабыми связями, при наличии в нем синхронных генераторов, наряду с ФЭС, удаленное КЗ не будет оказывать существенного влияния на характер и параметры электромеханических переходных процессов при аварийных возмущениях. Исключение составляют дефицитные энергорайоны, а также энергорайоны не имеющие в своем составе синхронные генераторы или же если их суммарная мощность незначительна.

8. В главе 4 (стр. 105) указаны предельные длительности КЗ, полученные исходя из факта потери синхронизма блоком ФАПЧ с сетью. Эти времена находятся в диапазоне 0,2-0,35 с. В реальных условиях эксплуатации при действии резервных защит с выдержками времени (ближнего, дальнего резервирования) времена отключения будут больше. Следует пояснить, какие мероприятия, учитывая рассмотренную особенность ФАПЧ, следует в этом случае реализовывать в энергорайоне и/или энергосистеме.

9. В главе 4 (стр. 109) в таблице 4.5 приводятся данные по величине нормализованного максимального отклонения, величина которых доходит до 95,49%, что существенно. Следует пояснить, являются ли эти результаты приемлемыми и в каких случаях.

10. Редакционные замечания:

- в Главе 1 (стр. 30) имеется неточность, так как в тексте упоминается ФЭС мощностью 550 МВт, (штат Калифорния, США), а в подписи к рис. 1.15 – 500 МВт;

- в Главе 3 (стр. 66, 67) и в ряде других мест периодически используются термины солнечная ячейка, солнечный элемент, солнечная панель, что некорректно, в соответствии с действующим ГОСТ Р 55993-2014/ IEC/TS 61836:2007 «Системы фотоэлектрические. Термины, определения и символы»;

- в Главе 3 (стр. 66) для обозначения выработки ФЭС не следует употреблять термин «генерация», так как он относится к роду, колену, поколению, т.е. совокупности представителей одного рода или вида (животных, растений, минералов и др.), имеющих одинаковое или сходное происхождение;

- в Главе 4 (стр. 93) в п. 1 указано на отключение ЛЭП 184-185, но вероятнее всего подразумевается отключение одной из ЛЭП, так как в случае отключения двух ЛЭП энергорайон выделился бы в островной режим работы;

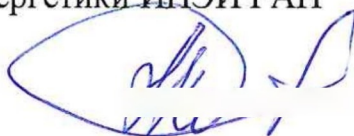
- в Главе 4 (стр. 99) величина коэффициента корреляции для удаленного КЗ, который равен 0,6645, относится с средней корреляционной связи.

8. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Рудника Владимира Евгеньевича «Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение научной и практической задачи, имеющей существенное значение для развития электроэнергетической отрасли страны, включая переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, выполненной автором самостоятельно на актуальную тему, которая соответствует требованиям п. 2.1., п. 2.2., п. 2.3. Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Рудник Владимир Евгеньевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – «Электроэнергетика».

Я, Илюшин Павел Владимирович, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, главный научный сотрудник,
руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем
и распределенной энергетики ИНЭИ РАН



Павел Владимирович Илюшин

23 января 2024 г.

Тел. (моб): +7(915) 092-98-33

E-mail: ilyushin.pv@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт энергетических исследований Российской академии наук» (ИНЭИ РАН)

Адрес: 117186, Россия, г. Москва, ул. Нагорная, д. 31, корп. 2

Телефоны: +7 (499) 127-46-64, +7 (499) 123-98-78, Факс: +7 (499) 123-44-85

E-mail: info@eriras.ru, Web-сайт: <https://www.eriras.ru/>

