

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

экспертной комиссии диссертационного совета ДС.ТПУ.17 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по предварительному рассмотрению диссертации Рудника Владимира Евгеньевича «Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика

«29» ноября 2023 г.

Комиссия диссертационного совета ДС.ТПУ.17 в составе:

Председатель: Обухов Сергей Геннадьевич – доктор технических наук, доцент, профессор отделения электроэнергетики и электротехники, ИШЭ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет;

Члены комиссии:

Лукутин Борис Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор отделения электроэнергетики и электротехники, ИШЭ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет;

Вайнштейн Роберт Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор-консультант отделения электроэнергетики и электротехники, ИШЭ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет;

Ушаков Василий Яковлевич – доктор технических наук, профессор, профессор отделения электроэнергетики и электротехники, ИШЭ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет;

Суворов Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники, ИШЭ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

рассмотрела диссертационную работу Рудника Владимира Евгеньевича «Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе», выполненную в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 148 наименований. Объем диссертации составляет 154 страницы, включая 109 рисунков, 11 таблиц, 1 приложение.

Комиссия провела проверку и установила идентичность текста диссертации, представленной в диссертационный совет на бумажном носителе, тексту диссертации в электронном варианте в формате *.pdf. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты.

Комиссия, предварительно рассмотрев диссертацию Рудника Владимира Евгеньевича «Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе», пришла к выводу о соответствии указанной диссертации требованиям п.п. 2.1-2.5 «Порядок присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете», утвержденного приказом ФГАОУ ВО НИ ТПУ от 28 декабря 2021 г. № 362-1/од.

1. Соответствие темы и содержания диссертации научной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа посвящена решению одной из важнейших задач в области электроэнергетики, связанной с обеспечением надежности и устойчивости функционирования современных электроэнергетических систем (ЭЭС) при внедрении новых объектов генерации на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности фотоэлектрических солнечных электростанций (ФСЭС). Особенностью ФСЭС является отсутствие прямого сопряжения с сетью и использование для их подключения к ЭЭС сетевого инвертора (СИ). В результате внедрения таких ФСЭС с СИ изменяются динамические свойства энергосистем из-за отличающийся динамики функционирования СИ и его системы управления по сравнению с традиционной генерацией, что приводит к разным проблемам, связанным с переходными процессами в ФСЭС и ЭЭС в целом. Такие проблемы особенно остро стоят при внедрении данных объектов в слабые электрические сети. Для решения возникающих проблем, в том числе связанных с колебаниями режимных параметров при функционировании ФСЭС, необходима информация о едином непрерывном спектре процессов в ФСЭС и ЭЭС в целом при всевозможных режимах их работы. Основным способом получения такой информации 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

детального моделирования ФСЭС в составе ЭЭС разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, объединение которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом.

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.

Диссертация содержит новые научные и практически значимые результаты в области электроэнергетики. Разработанные средства детального моделирования ФСЭС 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. Материалы диссертационного исследования являются оригинальными, стиль изложения логичен и хорошо структурирован. Диссертация обладает внутренним единством и написана автором единолично. В материалах диссертации и автореферате не содержится сведений ограниченного распространения, работа может быть опубликована в открытой печати.

По тематике, объектам и области исследования, разработанным научным положениям, научной и практической значимости представленная диссертация соответствует научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика, согласно следующим пунктам паспорта специальности:

П.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.

П.16. Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике.

2. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени и выполнение требований к публикации основных научных результатов диссертации, предусмотренных пунктами 2.3 и 2.4 Порядка присуждения ученых степеней в НИ ТПУ

Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 26 работах, в том числе в 6 статьях в рецензируемых изданиях перечня ВАК, в 6 работах в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, а также в одном патенте на изобретение и одном свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ. Также, результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на 16 международных и всероссийских научно-технических конференциях.

По представленному библиографическому списку и перечню публикаций автора можно сделать заключение о том, что основные положения диссертации достаточно полно изложены в опубликованных соискателем работах и апробированы на научных конференциях различного уровня. Требования к публикации основных научных результатов диссертации выполнены полностью.

3. Выполнение соискателем пункта 2.5 Порядка присуждения ученых степеней в НИ ТПУ

Анализ текста диссертации, публикаций соискателя и списка использованных источников позволяет сделать вывод, что в диссертации заимствованные материалы и отдельные результаты приводятся со ссылками на источники заимствования или их соавторов.

Требования п. 2.5 (*ссылаться на автора (авторов) и (или) источник заимствования материалов или отдельных результатов. При использовании в диссертации результатов научных работ, выполненных соискателем ученой степени лично и (или) в соавторстве, соискатель ученой степени обязан отметить в диссертации это обстоятельство*) полностью соблюдены.

Ссылки на библиографические источники, включая собственные публикации автора, оформлены в соответствии с требованиями стандарта, а библиографический список

характеризует достаточную глубину изучения автором рассматриваемого в работе научного направления.

4. Основные публикации, раскрывающие положения, выносимые на защиту

4.1. Разработанная концепция детального моделирования ФСЭС в составе ЭЭС и программно-аппаратные средства её реализации в виде специализированного гибридного процессора (СГП) позволяют воспроизводить переходные процессы при функционировании ФСЭС в слабых электрических сетях (отношение короткого замыкания (ОКЗ)<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 фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и контур управления током (КУТ):

1. Рудник В.Е. Верификация численных расчётов электромеханических переходных процессов при оценке устойчивости электроэнергетических систем с генерирующими объектами, использующими ВИЭ / А.А. Суворов, А.Б. Аскаров, В.Е. Рудник, И.А. Разживин, М.В. Андреев, Ю.Д. Бай // Электрические станции. – 2022. – № 1. – С. 25-37.

2. 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. Аскаров, В.Е. Рудник, М.В. Андреев, Ю.Д. Бай // Электрические станции. – 2022. – № 3. – С. 43-57.

3. 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.

4. Rudnik V.E. Analysis of low-frequency oscillation in power system with renewable energy sources / V.E. Rudnik, R.A. Ufa, Y. Y. Malkova // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – PP. 394–405.

5. 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. – PP. 75–85.

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.

7. 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».

4.2. 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:

1. 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.

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. Suworov, A. Askarov, V. Rudnik, I. Razzhivin, M. Andreev // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48. – PP. 4529–4542.

3. 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.

4.3. 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):

1. 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.

2. Рудник В.Е. Суворов А.А. Альтернативный метод моделирования электроэнергетических систем с фотоэлектрическими установками / В.Е. Рудник, А.А. Суворов // Цифровые технологии и платформенные решения для управления развитием электроэнергетики. Сборник научных трудов. I Всероссийская научно-практическая конференция. Севастополь. – 2023. – С. 218-224.

3. 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.

4.4. 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:

1. Rudnik V.E. Application of generating units based on renewable energy sources for damping oscillations in the power system / R. Ufa, V. Rudnik, Y. Sarsikeyev, Y. Malkova, G. Ansabekova // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9. – PP. 302-311.

2. 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. – PP. 75–85.

3. 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.

В качестве оппонентов диссертационной работы Рудника Владимира Евгеньевича «Программно-технические средства моделирования в реальном времени

фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе», экспертная комиссия рекомендует:

- Илюшина Павла Владимировича, доктора технических наук, Институт энергетических исследований Российской академии наук, руководителя Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики, главного научного сотрудника, г. Москва;
- Сулова Константина Витальевича, доктора технических наук, доцента, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессора кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, г. Москва.

В качестве дополнительных членов диссертационного совета ДС.ТПУ.17 экспертная комиссия рекомендует:

- Гарганеева Александра Георгиевича, доктора технических наук, профессора, ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, профессора отделения электроэнергетики и электротехники, г. Томск;
- Букреева Виктора Григорьевича, доктора технических наук, профессора, ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, профессора отделения электроэнергетики и электротехники, г. Томск.

Заключение

Тема и содержание диссертационной работы Рудника Владимира Евгеньевича «Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе», соответствуют научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика.

Материалы диссертации в полной мере изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Выполнены требования к публикациям основных научных результатов диссертационной работы, предусмотренные пунктами 2.3 и 2.4 «Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете», утвержденного приказом ФГАОУ ВО НИ ТПУ от 28 декабря 2021 г. № 362-1/од.

В диссертации отсутствуют материалы, заимствованные без ссылки на авторов и источники заимствования, результаты научных работ, выполненных соискателем ученой степени в соавторстве, без ссылок на соавторов. Автореферат отражает содержание диссертационной работы.

На основании вышеизложенного комиссия считает возможным принять диссертацию Рудника Владимира Евгеньевича «Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе» к защите в совете ДС.ТПУ.17 на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика.

Председатель комиссии

д.т.н., доцент

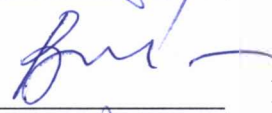

С.Г. Обухов

Члены комиссии:

д.т.н., профессор


Б.В. Лукутин

д.т.н., профессор


Р.А. Вайнштейн

д.т.н., профессор


В.Я. Ушаков

к.т.н.


А.А. Суворов