

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по науке и стратегическим
проектам Национального исследовательского
Томского политехнического университета

 Степанов И.Б.
 10 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

Диссертация «**Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе**» по специальности 2.4.3. Электроэнергетика выполнена в Отделении электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Рудник Владимир Евгеньевич обучался в очной аспирантуре и в настоящий момент работает в должности ассистента в отделении электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В 2019 г. окончил с отличием магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический

университет» по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

В 2023 г. окончил очную аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника.

Диплом об окончании аспирантуры по направлению подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника, специальности 2.4.3 Электроэнергетика выдан в 2023 г.

Научный руководитель – Суворов Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа Рудника Владимира Евгеньевича на тему **«Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе»** является законченной научно-квалификационной работой.

1. Актуальность темы исследования обусловлена 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 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, 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. 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 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 детальное моделирование ФСЭС в составе ЭЭС разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, объединение которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом.

2. Личное участие и вклад соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации. Основные научные положения, результаты и выводы диссертационной работы получены автором лично. Анализ полученных результатов выполнен автором совместно с научным руководителем.

3. Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается за счет применения апробированных положений теории надежности и устойчивости ЭЭС, использования известных положений фундаментальных и прикладных наук, корректного использования математического аппарата и соответствующих математических моделей со структурой, адекватной исследуемым процессам,

соответствия результатов теоретического анализа и экспериментальных исследований, непротиворечивости результатов диссертационной работы выводам, которые получены другими авторами, а также обсуждения отдельных положений и результатов работы с отечественными и зарубежными специалистами в рамках конференций и других научных мероприятий.

4. Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.

По теме диссертации опубликовано 26 научных работ, среди которых 6 - в журналах из перечня ВАК; 6 - в журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, получены 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК РФ, в которых изложены основные положения:

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. Аскаров, 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. Аскаров, 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. Аскаров, 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 журналах, индексируемых в базах Scopus и WoS:

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. 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.

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. Study of the influence of synthetic inertia on transient stability of electric power systems / I. Razzhivin, A. Suворov, M. Andreev, V. Rudnik // Electrical Engineering. – 2022.

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.

Патент РФ на изобретение:

1. Патент № 2694014 РФ, МПК G06G7/62. Устройство для моделирования передачи постоянного тока в энергетической системе // Р.А. Уфа, А.С. Гусев, М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан, А.А. Суворов, А.Б. Аскарлов, И.А. Разживин, А.В. Кивец, Ю.Д. Бай; заявитель и патентообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Свидетельства о 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. Кивец // Дата публикации: 03.09.2020, заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

5. Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на 16 международных и всероссийских научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах: Международная научно-техническая конференция «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 т.д.

6. Научная новизна работы.

1. Разработан и реализован специализированный гибридный процессор ФСЭС, в котором предполагается использование физических моделей для повышающего преобразователя постоянного тока и статического преобразователя напряжения, что позволяет воспроизводить динамику цепи постоянного тока и функционирование быстродействующих систем управления ФСЭС: блока фазовой автоподстройки частоты и внутреннего контура управления током.

2. Доказано, что модернизация обобщенной математической модели ФСЭС путём добавления только блока фазовой автоподстройки частоты 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 также является учёт в обобщенной математической модели ФСЭС всей структуры внутреннего контура управления током, основу которого, как правило, составляют пропорционально-интегральные регуляторы во вращающихся с частотой сети осях d, q .

7. Практическая значимость работы. Разработанные средства всережимного моделирования ФСЭС позволяют получать информацию о режимах и процессах ФСЭС, функционирующих в составе ЭЭС, при нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимую для эффективного решения актуальных для электроэнергетической отрасли задач проектирования, исследования и эксплуатации, 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. Данная информация может быть актуальна для предприятий и компаний, которые занимаются вопросами проектирования и эксплуатации ФСЭС в составе ЭЭС.

Результаты диссертационной работы использовались при реализации 3-х проектов РНФ № 18-79-10006, № 21-79-00129, № 21-79-00275.

8. Рассматриваемая диссертация является законченной научно-квалификационной работой, содержит научные и практически важные результаты. В работе представлена новая гибридная модель для детального моделирования объекта ФСЭС. Диссертационная работа соответствует требованиям Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Диссертация «Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в

электроэнергетической системе» Рудника Владимира Евгеньевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика.

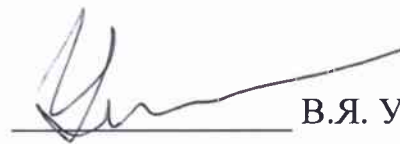
Заключение принято в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на заседании электроэнергетической секции Научно-технического совета Инженерной школы энергетики.

Присутствовало на заседании 10 чел. очно, из 14 членов Электроэнергетической секции Научно-технического совета Инженерной школы энергетики.

В голосовании участвовало 9 членов НТС.

Результаты голосования: «за» - 9 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 11 от «05» октября 2023 г.

Председатель Электроэнергетической секции Научно-технического совета, д.т.н., профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики



В.Я. Ушаков

Секретарь научно-технического совета, Инженерной школы энергетики



С.В. Филимонова

Подписи Ушакова В.Я. и Филимоновой С.В. заверяю

Ученый секретарь Ученого совета ТПУ



Е.А. Кулинич