

ОТЗЫВ

дополнительного члена диссертационного совета ДС.ТПУ.17 **Гарганеева Александра Георгиевича** на диссертационную работу **Рудника Владимира Евгеньевича «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. Структура и объем диссертации

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 148 наименований, 1 приложение. Основное содержание работы изложено на 154 страницах машинописного текста, содержит 109 рисунков, 11 таблиц. Автореферат отражает содержание диссертационной работы в необходимом объеме.

2. Анализ содержания диссертационной работы

Во **введении** приведено обоснование актуальности диссертационной работы, поставлены цели и задачи исследования. Сформулирована научная новизна и практическая значимость выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ влияния внедрения объектов генерации на базе возобновляемых источников, в частности фотоэлектрических солнечных электростанций (ФСЭС). Выделены проблемы, связанные с их внедрением в электроэнергетические системы (ЭЭС). Обосновано, что основным способом анализа возникающих проблем, является математическое моделирование. Рассмотрены подходы к моделированию ЭЭС с ФСЭС с помощью программно-вычислительных (ПВК) и программно-аппаратных (ПАК) комплексов, отмечены их особенности. В качестве альтернативы предложен всережимный подход к моделированию ФСЭС в ЭЭС.

Во **второй главе** обозначено, что наиболее перспективной и эффективной как в отечественной, так и в мировой энергетике является ФСЭС состоящая из: а) набора фотоэлектрических модулей (ФЭМ); б) повышающего преобразователя постоянного тока (ПППТ); в) цепи

постоянного тока (ЦПТ); г) сетевого инвертора (СИ); д) фильтра высших гармоник (ФВГ). На основании данной конфигурации ФСЭС были предложены основные положения концепции всережимного моделирования ФСЭС, а также разработана структура средств её реализации на базе Всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС), который является ПАК для моделирования электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

В третьей главе представлены результаты разработки программно-аппаратного средства всережимного моделирования ФСЭС, представляющего из себя специализированный гибридный процессор (СГП) ФСЭС. Приведена всесторонняя верификация разработанных средств моделирования ФСЭС в сравнении с результатами моделирования, полученными с помощью ПАК Real Time Digital Simulator (RTDS). Помимо сравнения созданных средств с моделями в ПАК, выполнено сравнение с натурными данными из открытых источников.

В четвертой главе продемонстрированы свойства и возможности разработанного экспериментального образца СГП ФСЭС в составе ВМК РВ ЭЭС, на базе которого была реализована тестовая ЭЭС. Выполнено два направления исследований: 1) верификация модернизированной обобщенной модели ФСЭС; 2) возможность воспроизведения колебаний режимных параметров при функционировании ФСЭС в слабых сетях и реализация возможных средств их демпфирования.

В заключении изложены основные результаты диссертационного исследования, отражающие решение поставленных задач.

Проведенный анализ содержания диссертационной работы свидетельствует о том, что диссертация Рудника Владимира Евгеньевича является завершенной квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи. Диссертация написана ясным и содержательным языком, принятая терминология и стиль соответствует общепринятым нормам.

3. Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа В.Е. Рудника посвящена вопросу детального моделирования ФСЭС в составе ЭЭС. 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 существенно изменяются динамические свойства энергосистем из-за отличающийся динамики функционирования СИ и его системы управления по сравнению с традиционной генерацией. Данная особенность может вызывать в энергосистемах колебания режимных параметров. Обозначенная проблема особенно остро стоит при внедрении данных объектов в энергосистемы, которые могут быть классифицированы как слабые электрические сети с помощью коэффициента отношения короткого замыкания (ОКЗ) в соответствии с международной терминологией. 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 обозначенных проблем, связанных с анализом переходных процессов в ЭЭС с ФСЭС, необходима информация о процессах в ФСЭС и ЭЭС при различных режимах их работы, которую возможно получить с помощью моделирования. Учитывая изложенное, актуальность выбранной соискателем тематики диссертационного исследования не вызывает сомнений.

4. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности 2.4.3 – Электроэнергетика

Содержание диссертации и автореферата соответствуют пунктам 14 и 16 паспорта научной специальности 2.4.3.

5. Степень обоснованности научных положений и достоверности полученных результатов

Степень обоснованности и достоверности полученных научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением известных теоретических методов, сопоставлением с результатами других исследований, тщательным анализом и оценкой принятых исходных данных и полученных результатов. Основные выводы и результаты работы теоретически обоснованы и получены автором впервые.

6. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций

В представленной к оппонированию работе:

1) 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 фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), ЦПТ, 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.

2) разработана концепция детального моделирования ФСЭС в составе ЭЭС и программно-аппаратные средства её реализации в виде СГП, в которых предполагается использование физических моделей для повышающего преобразователя постоянного тока (ПППТ) и СИ, что позволяет воспроизводить динамику цепи постоянного тока и функционирование быстродействующих систем управления ФСЭС: ФАПЧ и контура управления током (КУТ).

3) 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.

7. Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

В представленной к оппонированию работе 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. Полученные результаты и выводы диссертационной работы могут быть актуальны для

предприятий и компаний, которые занимаются вопросами проектирования и эксплуатации ФСЭС в составе ЭЭС. Также стоит отметить, что результаты диссертационной работы Рудника В. Е. использовались при реализации нескольких проектов РНФ №18-79-10006, №21-79-00129, №21-79-00275.

8. Публикации и апробация материалов диссертационной работы

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 и Scopus. Результаты научных исследований были представлены на авторитетных международных и всероссийских научных конференциях.

9. Основные замечания по работе

По представленной диссертационной работе можно сделать следующие замечания.

1. Из информации, представленной в диссертации, не совсем очевидно каким образом осуществлялось масштабирование ФСЭС до объектов большой мощности?

2. В диссертации вполне аргументированно обоснованы причины, препятствующие решению рассмотренной проблемы в рамках использования обобщенных математических моделей ФСЭС. Однако, реализующие этот подход ПВК для расчета режимов и процессов в ЭЭС по-прежнему остаются единственным инструментом для решения указанных в диссертации задач, а перспектива широкого внедрения созданных средств автором диссертации не отобразена.

10. Заключение

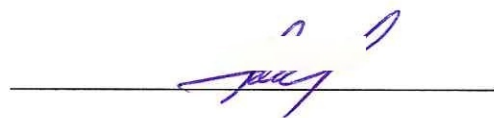
Полученные результаты исследований и выводы доказывают, что Рудник Владимир Евгеньевич выполнил актуальную научно-исследовательскую работу, имеющую важное теоретическое и прикладное значение для развития электроэнергетики.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполнена автором единолично, имеет научную новизну и практическую значимость. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертационная работа Рудника Владимира Евгеньевича «Программно-технические средства моделирования в реальном времени фотоэлектрической солнечной электростанции в электроэнергетической системе», по уровню, объему и значимости соответствует требованиям п. 2 «Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете», а ее автор, Рудник Владимир Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – «Электроэнергетика» (технические науки).

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета ДС.ТПУ.17 Национального исследовательского Томского политехнического университета и их дальнейшую обработку.

Дополнительный член диссертационного совета ДС.ТПУ.17,
доктор технических наук, профессор, профессор отделения
электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»



Гарганеев Александр Георгиевич

«5» февраля 2024 г.

Почтовый адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30

Тел. +7 (3822) 701777 вн.т. 1956

E-mail: tpbalex13@tpu.ru

Подпись А.Г. Гарганеева заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета

Национального исследовательского

Томского политехнического университета



Кулинич Екатерина Александровна