

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям
федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования



«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

д-р. физ.-мат. наук, доцент Швейкин А.И.

«23» 04 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Гусева Глеба Николаевича

«Обоснование рациональных режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии на основе адаптивного регулирования реактивной мощности»

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Актуальность темы диссертационной работы.

В современных условиях развития энергетики особую значимость приобретает задача повышения эффективности и надёжности работы электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии. Это обусловлено как ростом доли ВИЭ в энергобалансе, так и необходимостью обеспечения устойчивых режимов работы электротехнических систем с ВИЭ при стохастическом характере генерации.

Одной из ключевых проблем функционирования таких систем является обеспечение допустимых режимов по напряжению и коэффициенту мощности, что напрямую связано с регулированием реактивной мощности силовых преобразователей. При этом нестабильность входных параметров, обусловленная

природой солнечной и ветровой генерации, требует применения адаптивных алгоритмов управления.

Таким образом, диссертация, направленная на разработку методик формирования стохастических входных воздействий и адаптивного регулирования реактивной мощности силовых преобразователей, обладает несомненной актуальностью и практической значимостью.

Анализ содержания диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, четырёх приложений, содержит 128 страниц, в том числе 26 рисунков, 8 таблиц, список цитируемых литературных источников, состоящий из 46 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, приведены научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе проведён анализ современного состояния возобновляемой энергетики и тенденций её развития. Показано, что установленная мощность ВИЭ в России составляет порядка 6,52 ГВт, при этом около 71,7% приходится на объекты, реализованные в рамках механизмов государственной поддержки. На фоне этого мировой рынок демонстрирует экспоненциальный рост, и к 2030 году суммарная установленная мощность ВИЭ прогнозируется на уровне свыше 17 000 ГВт. В главе рассмотрены типовые архитектуры фотоэлектрических станций с интеграцией накопителей энергии, показано, что их применение позволяет сгладить профиль генерации и повысить эффективность использования установленной мощности, которая в базовой конфигурации не превышает порядка 40%. Также приведён сравнительный анализ алгоритмов управления, где показано снижение переходных потерь до 20-25% при использовании интеллектуальных методов МРРТ и увеличение выработки ветроустановок на 10–15% при применении адаптивного управления.

Во второй главе разработана методика формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя на основе климатических данных. В основе расчётов лежат среднегодовые данные солнечной радиации, представленные в виде месячных значений и приведённые к 12 характерным дням года. Введены зависимости для расчёта суммарной, прямой и диффузной составляющих солнечной радиации, а также критерий выбора расчётной модели по среднеквадратической ошибке. Методика позволяет перейти от интегральных климатических характеристик к непрерывным временным рядам электрических параметров, формирующих входные воздействия для силового преобразователя. Аналогичный подход реализован для ветрового ресурса с использованием

статистической обработки многолетних данных и вероятностных распределений, что обеспечивает формирование корректных временных рядов мощности.

В третьей главе разработана математическая модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, учитывающая ограничения по полной мощности преобразователя и его параметры. На основе математической модели создана имитационная модель центрального сетевого солнечного инвертора в среде MATLAB/Simulink, позволяющая исследовать режимы работы электротехнической системы с ВИЭ при стохастических входных воздействиях. Полученные результаты моделирования подтверждают устойчивость алгоритма при колебаниях входных параметров и обеспечивают соблюдение требований по напряжению и коэффициенту мощности.

В четвертой главе рассмотрена реализация разработанного алгоритма в программной среде MasterSCADA и его апробация в условиях опытной эксплуатации. Верификация выполнена на основе данных действующей солнечной электростанции, при этом достигнута сходимость результатов моделирования и реальных данных на уровне не ниже 0,9. Показано, что разработанный алгоритм обеспечивает устойчивую работу системы при изменении входного напряжения и позволяет поддерживать заданные режимы работы силового преобразователя.

В заключении автором приводятся основные научные и практические результаты работы.

Автореферат отражает основные результаты исследований и соответствует содержанию диссертации.

Научная новизна и значимость работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Показано, что непрерывные вероятностные характеристики солнечного и ветрового ресурсов могут быть преобразованы в непрерывные временные ряды активной мощности генерации, сохраняющие математическое ожидание, дисперсию и вероятностную структуру исходных данных, что позволяет использовать их в задачах моделирования режимов работы силовых преобразователей электротехнических систем с ВИЭ.

2. Разработана математическая модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя, в которой уставка реактивной мощности формируется с учётом текущих значений входного напряжения, выходных параметров сети и ограничения по полной мощности, что обеспечивает предотвращение выхода инвертора за допустимые режимы работы.

3. Разработана имитационная модель центрального сетевого солнечного инвертора, которая воспроизводит функционирование адаптивного алгоритма и позволяет исследовать режимы работы электротехнической системы с ВИЭ.

4. Создана компьютерная модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, позволяющая оценивать устойчивость режимов электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии при колебаниях входного напряжения.

Практическая ценность работы состоит в разработке подхода к проектированию электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии, учитывающего как активную, так и реактивную составляющие мощности.

Разработанные метод формирования стохастических значений входных параметров и адаптивный алгоритм регулирования реактивной мощности силового преобразователя внедрены в ООО «Парус электро» при разработке первого отечественного центрального сетевого солнечного инвертора мощностью 1,5 МВт и применяются при эксплуатации солнечных электростанций суммарной мощностью свыше 300 МВт.

Результаты и выводы диссертационной работы могут быть использованы проектными, научно-исследовательскими и производственными организациями, занимающимися разработкой силовых преобразователей и систем управления электротехническими системами с возобновляемыми источниками энергии, а также при проектировании автономных и гибридных электротехнических систем для удалённых объектов, промышленных предприятий и малых населённых пунктов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Изложенные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации являются обоснованными и достоверными, что подтверждается использованием представительного объёма исходной информации по климатическим параметрам солнечного и ветрового ресурсов, полученной из международных баз данных наблюдений, а также применением современных методов математического и имитационного моделирования.

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием методов теории вероятностей и математической статистики при формировании стохастических входных воздействий, а также высокой степенью согласованности результатов моделирования с данными опытной эксплуатации. Показано, что сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных достигает уровня не ниже 0,9, что свидетельствует о достаточной точности разработанных

моделей и алгоритма. Дополнительным подтверждением является реализация предложенного алгоритма в промышленной программной среде и его апробация на действующем объекте.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных мероприятиях, посвящённых вопросам возобновляемой энергетики, силовой электроники и управления электротехническими системами. Международная апробация результатов подтверждена докладом на конференции Renewable Energy and Power Engineering (REPE 2025, г. Пекин, Китай).

По теме диссертационного исследования опубликовано 3 научные статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, из них 1 научная статья индексируемая в международной базе научного цитирования Scopus.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается наличием 2 патентов Российской Федерации на полезные модели в области силовой электроники, полученных с участием автора, что свидетельствует о прикладной направленности работы и возможности внедрения разработанных решений в промышленность.

Замечания по диссертации и автореферату.

Вместе с тем по диссертационной работе могут быть высказаны отдельные замечания.

В работе недостаточно подробно раскрыт вопрос влияния точности исходных климатических данных и выбора параметров вероятностных моделей на формирование стохастических временных рядов мощности, что могло бы дополнительно обосновать устойчивость полученных результатов при изменении исходных данных.

В ряде разделов, посвящённых моделированию, представленные результаты ориентированы преимущественно на солнечные электростанции, при этом расширение анализа на режимы работы электротехнических систем с ветроэнергетическими установками позволило бы повысить универсальность разработанного подхода.

Имеются отдельные замечания по изложению и оформлению диссертации, в частности в тексте встречаются обозначения, вводимые без предварительного пояснения, а также отдельные повторения формулировок в автореферате.

В ряде мест целесообразно уточнить используемые термины, например, при описании вероятностных характеристик корректнее использовать выражение «плотность распределения вероятности», что повысило бы строгость изложения.

Отмеченные замечания носят рекомендательный характер и не снижают научной и практической значимости представленной диссертационной работы.

Общая оценка работы.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы». По объекту и предмету исследования выполненная работа относится к области науки и техники, изучающей закономерности функционирования электротехнических систем, методы их анализа, моделирования и управления, включая разработку алгоритмов регулирования и исследование режимов работы силовых преобразователей.

Диссертационная работа обладает научной новизной, а полученные результаты имеют практическое значение для повышения устойчивости и эффективности функционирования электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии. Основные положения работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, при этом публикации отражают ключевые результаты, выносимые на защиту. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Текст диссертации и автореферата изложен технически грамотным языком и оформлен в соответствии с установленными требованиями.

Заключение.

Диссертационная работа Гусева Глеба Николаевича «Обоснование рациональных режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии на основе адаптивного регулирования реактивной мощности» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача обеспечения рациональных режимов электротехнических систем с ВИЭ на основе адаптивного регулирования реактивной мощности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» и требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Диссертация и отзыв обсуждены и утверждены на заседании кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» федерального государственного


автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Протокол № 20 от «15» апреля 2026 г.

И.о. заведующего кафедрой
«Микропроцессорные средства автоматизации»
Кандидат технических наук
Тел./факс +7(342)2-391-822
e-mail: romodin_av@pstu.ru

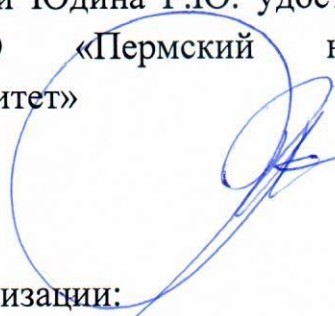
 /А.В. Ромодин/

Доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации»
Кандидат технических наук
Тел./факс +7(342)2-391-822
e-mail: rjujudin@pstu.ru

 /Р.Ю. Юдин/

«15» апреля 2026 г.

Подписи Ромодина А.В. и Юдина Р.Ю. удостоверяю: ученый секретарь Ученого совета ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
доцент, канд. ист. наук



Макаревич Владимир Иванович

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ФГАОУ ВО «ПНИПУ»)

Адрес: Россия, 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29

Телефон: +7 (342) 219-80-67; +7(342) 212-39-27

E-mail: rector@pstu.ru

<https://pstu.ru/>

Кандидатская диссертация Ромодина А.В. защищена по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности).

Кандидатская диссертация Юдина Р.Ю. защищена по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы.