

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.017.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ СИСТЕМ
ЭНЕРГЕТИКИ ИМ. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета от 14.09.2022 г. N 21

О присуждении Муфтахову Ильдару Ринатовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Модели Вольтерра накопителей энергии в системах с возобновляемой генерацией: численные методы и приложения» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) принята к защите 07.06.2022 (протокол заседания № 16) диссертационным советом Д 003.017.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, создан приказом Минобрнауки России №105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Муфтахов Ильдар Ринатович, 1990 года рождения, в 2012 году с отличием окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем». В 2015 году соискатель окончил очную аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Министерство образования и науки Российской Федерации, по направлению 09.06.01 Информатика и вычислительная техника, научная специальность – 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Работает ведущим инженером в ООО «Техкомпания Хуавэй» в подразделении: Новосибирский центр исследований и разработок (г. Иркутск).

Диссертация выполнена в Институте информационных технологий и анализа данных федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент, профессор РАН Сидоров Денис Николаевич, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, отдел прикладной математики, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Чистяков Виктор Филимонович, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, Лаборатория 1.1 Дифференциальных уравнений и управляемых систем, главный научный сотрудник;

Искаков Алексей Борисович, кандидат физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, лаборатория №82 «Моделирования и управления большими системами», заведующий лабораторией, старший научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном Кустаревым Павлом Валерьевичем, кандидатом технических наук, деканом факультета программной инженерии и компьютерной техники, и утвержденном Никифоровым Владимиром Олеговичем, доктором технических наук, профессором, проректором по научной работе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», указала, что диссертационная работа отвечает всем основным требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационным исследованиям по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 20 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 9 работ являются статьями в ведущих рецензируемых научных изданиях из списка ВАК РФ по специальности 05.13.18 и 7 работ – в изданиях, индексируемых Web of Science и/или Scopus.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации. Заимствования, не отмеченные ссылками, отсутствуют. Конфликт интересов между соискателем и соавторами отсутствует.

Наиболее значимые работы:

1. Nonlinear Systems of Volterra Equations with Piecewise Smooth Kernels: Numerical Solution and Application for Power Systems Operation [Text] / Denis Sidorov, Aleksandr Tynda, Ildar Muftahov [et al.] // Mathematics. — 2020. — Aug. — Vol. 8, no. 8. — P. 1257. — DOI: 10.3390/math8081257.

2. Muftahov, Ildar. Numeric solution of Volterra integral equations of the first kind with discontinuous kernels [Text] / Ildar Muftahov, Aleksandr Tynda, Denis Sidorov // Journal of Computational and Applied Mathematics. — 2017. — Vol. 313. — P. 119 – 128. — DOI: 10.1016/j.cam.2016.09.003.

3. Muftahov, I. R. Solvability and numerical solutions of systems of nonlinear Volterra integral equations of the first kind with piecewise continuous kernels [Text] / I. R. Muftahov, D. N. Sidorov // Bul. of the South Ural State University. Ser. "Math. Model., Programming and Comp. Software". — 2016. — Vol. 9, no. 1. — P. 130–136. — DOI: 10.14529/mmp160111.

4. Муфтахов, И. Р. О регуляризации по Лаврентьеву интегральных уравнений первого рода в пространстве непрерывных функций [Текст] / И. Р. Муфтахов, Д. Н. Сидоров, Н. А. Сидоров // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. — 2016. — Т. 15. — С. 62–77.

5. Сидоров, Д. Н. Численное решение интегральных уравнений Вольтерра I рода с кусочно-непрерывными ядрами [Текст] / Д. Н. Сидоров, А. Н. Тында, И. Р. Муфтахов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. — 2014. — Т. 7, № 3. — С. 107–115. — DOI: 10.14529/mmp140311.

На диссертацию и автореферат поступили **отзывы**:

1. От Илюшина Павла Владимировича, доктора технических наук, главного научного сотрудника, руководителя Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт энергетических исследований Российской академии наук» (ИНЭИ РАН). Отзыв положительный, содержит три замечания: 1) Широко применяемые в мире накопители энергии с литий-ионными аккумуляторными батареями имеют ограничения по циклам зарядов-разрядов, что при неоднократном использовании в течение суток приводит к исчерпанию ресурса за 4-6 лет. Не эффективнее ли использовать группы накопителей, одни из которых в течение одних календарных суток работают только на заряд, а другие — только на разряд, а на следующие сутки меняются ролями? 2) Эффективна ли, по мнению соискателя, установка накопителей энергии на каждой ветровой и солнечной электростанции или больший эффект дадут несколько системных накопителей, установленных в определенных, на основании результатов расчетов электрических режимов, узлах сети? 3) Каким образом для каждого накопителя энергии выбирается оптимальный уровень текущего заряда, учитывая то, что в одних режимах ЭЭС они должны выдавать, а в других потреблять избыточную мощность? Приведенные вопросы ни к коей мере не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Муфтахова И.Р.

2. От Шишленина Максима Александровича, доктора физико-математических наук, профессора РАН, заместителя директора по научной работе института математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук. Отзыв положительный, содержит два замечания: 1) В автореферате не везде указаны единицы измерения. 2) следовало бы указать более подробную информацию о разработанном программном комплексе, а именно, дать более подробное описание архитектуры комплекса, языка программирования, функциональные возможности.

3. От Бойкова Ильи Владимировича, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой "Высшая и прикладная математика" Пензенского государственного университета. Отзыв положительный, без замечаний.

4. От Воскобойникова Юрия Евгеньевича, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой прикладной математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)». Отзыв положительный, содержит одно замечание: в предложенном методе регуляризации (автореферат стр. 11) используется параметр регуляризации, от величины которого зависит ошибка получаемого решения. К сожалению, из автореферата не ясно, как происходит выбор величины этого параметра. Это замечание не снижает ценности работы и не затрагивает основных положений, выносимых на защиту.

5. От Будниковой Ольги Сергеевны, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры математики и методики обучения математике федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет». Отзыв положительный, содержит четыре замечания: 1) Текст содержит опечатки (например, на стр. 9, 3-я строка сверху; на стр. 10, 8-я снизу; на стр. 11, 6-я строка снизу и т. д.), количество которых, тем не менее, находится в допустимых пределах. 2) Отсутствует расшифровка некоторых специальных аббревиатур (например, на стр. 13 следовало бы указать, что SoC означает уровень заряда батареи). 3) Недостаточно раскрыт важный вопрос сравнения разработанных в диссертации алгоритмов с уже известными численными методами решения рассматриваемого класса систем интегральных уравнений. Следовало бы пояснить предпочтение формуле средних прямоугольников более простым квадратурным формулам – левых или правых прямоугольников. 4) Судя по автореферату, в представленной диссертации не обсуждаются вопросы о свойствах разработанных численных методов таких, как сходимость, саморегуляризация численного алгоритма и т. д. Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления о диссертации и высокой оценки ее автореферата.

6. От Яголы Анатолия Григорьевича, доктора физико-математических наук, профессора кафедры математики отделения прикладной математики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, Лукьяненко Дмитрия

Витальевича, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры математики отделения прикладной математики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Отзыв положительный, содержит одно замечание: в работе предложены новые математические модели на основе интегральных уравнений Вольтерра с ядром особого вида, однако следовало бы уделить больше внимания физической интерпретации эффекта разрыва ядра при работе с накопителями энергии, так как более детальное описание предложенных математических моделей значительно улучшило бы практическую значимость диссертационной работы. Указанное замечание не влияет на общую положительную оценку проведенного диссертационного исследования и не снижает значимости полученных результатов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается сферой их научных интересов и исследований в области обратных задач и численных методов, что подтверждается научными публикациями официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации и их способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработаны** новые методы построения численных решений скалярных интегральных уравнений Вольтерра первого рода с разрывными ядрами для случая нелинейной зависимости искомой функции и систем уравнений, а также предложен регуляризованный метод с использованием квадратур Гаусса;

- **предложен** методический подход на основе интегральных моделей и методов определения режимных параметров накопителей с нелинейно меняющимися со временем коэффициентами полезного действия в системах с возобновляемыми источниками энергии;

- **доказана** на примере задачи моделирования накопителей энергии эффективность разработанного методического подхода, моделей, методов и алгоритмов;

- **введены** новые методы, позволяющие выполнить расчеты режимных параметров накопителей энергии.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **доказана** возможность применения интегральных уравнений Вольтерра для вычисления знакопеременной функции изменения мощности накопителей энергии;

- **применительно к проблематике диссертации результативно** (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован** коллокационный метод, основанный на квадратуре Гаусса, также использованы квадратурные формулы средних прямоугольников;

- **изложены** предлагаемые автором методы расчета режимных параметров накопителей энергии в распределенных системах аккумулирования энергии для объединения нескольких электроэнергетических систем;

– **раскрыты** недостатки существующего подхода, связанные с отсутствием комплексной методики определения режимных параметров накопителей, у которых коэффициенты полезного действия могут изменяться со временем;

– **изучены** методы моделирования развивающихся динамических систем, а также методы численного решения интегральных уравнений;

– **проведена модернизация** кулоновского метода определения уровня заряда накопителей энергии путем сведения к решению обратной задачи, выраженной интегральным уравнением Вольтерра первого рода, обеспечивающая получение более точных результатов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– **разработаны и внедрены:** 1) программа для ЭВМ "Программная система анализа и сравнения результатов численных решений линейных интегральных уравнений Вольтерра первого рода с разрывными ядрами"; 2) программа для ЭВМ "Программно-вычислительный комплекс для эффективного управления накопителями энергии на основе уравнений Вольтерра";

– **определены** области практического применения методики расчета режимных параметров накопителей энергии в системах с возобновляемой генерацией;

– **создана** методика решения обратных задач для определения режимных параметров накопителей энергии на основе интегральных уравнений Вольтерра первого рода, которая может быть использована в других прикладных областях;

– **представлены** научно-методические результаты, имеющие прикладное значение в проектировании и эксплуатации систем с возобновляемыми источниками энергии.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

– **для экспериментальных работ результаты получены с использованием** модели Вольтерра, которые для случая с константным ядром практически идентичны классической ампер-часовой математической модели накопителей энергии, представляемой в виде прямой задачи;

– **теория** опирается на фундаментальные работы отечественных и зарубежных авторов в области решения обратных и некорректно поставленных задач, а также исследований по моделированию развивающихся динамических систем;

– **идея** базируется на необходимости разработки математических моделей покрытия дисбаланса нагрузки в системах с возобновляемой генерацией и определения режимных параметров накопителей энергии, учитывающей нелинейные процессы сокращения располагаемой емкости накопителей с течением времени;

– **использованы** фундаментальные результаты, полученные ранее другими исследователями в рассматриваемой в диссертационной работе

области и опубликованные в отечественных и зарубежных научных изданиях;

– **установлено**, что полученные соискателем результаты подтверждаются корректным использованием методов исследования развивающихся динамических систем, строгой математической постановкой задачи, адекватностью применяемого математического аппарата, устойчивостью используемых численных методов, а также расчетами, выполненными как на тестовых примерах, так и на реальных данных;

– **использованы** методы математического моделирования, вычислительной математики, а также элементы теории интегральных, дифференциальных уравнений и прикладного функционального анализа.

Личный вклад соискателя состоит в:

непосредственном участии соискателя в постановке цели и задач исследований; разработке новых моделей и методов определения режимных параметров накопителей с нелинейно меняющимися со временем коэффициентами полезного действия в системах с возобновляемыми источниками энергии; построении численных решений скалярных интегральных уравнений Вольтерра первого рода с разрывными ядрами для случая нелинейной зависимости искомой функции и систем уравнений; построении регуляризованного метода с использованием квадратур Гаусса; разработке комплекса программ для вычисления режимных параметров накопителей энергии на основе интегральных уравнений Вольтерра первого рода с разрывными ядрами, который позволяет проводить вычислительные эксперименты и исследовать свойства предложенных алгоритмов при моделировании накопителей энергии.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1) Предложены новые динамические модели, основанные на уравнении Вольтерра. Есть какие-то другие возможности моделировать накопители и есть ли сравнительный анализ – эффективнее ли они, точнее или быстрее?

2) Накопители энергии – это достаточно сложные объекты, которые могут быть с одной стороны как генераторы электроэнергии, с другой стороны могут выступать как потребители. Традиционно и объемы ввода накопителей, и режимы их работы циклы заряда/разряда определялись в рамках оптимизационных моделей, где подробно представлена сама система и топология сети. По сравнению с этим традиционным подходом, который адекватно решал эту задачу, в чем преимущество вашего подхода? У вас он довольно сложный, имеется пример с применением модели в двухэтапной оптимизации, в которой сначала минимизируется использование накопителей, а потом и перетоки.

3) У вас в заключении написано, что предложенные в научной работе математические модели являются универсальными и могут применяться в проектировании и эксплуатации интегрированных энергетических систем. Такие системы в свою очередь включают в себя и электро-, тепло- и

газоснабжающие подсистемы. Можно ли ваши методы распространить на них?

Соискатель Муфтахов И.Р. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1) В работе проведен анализ существующих методов, рассматривались не только классические подходы, но и дифференциальные уравнения, применяемые при решении похожих обратных задач, но в них нет свойства эредитарности, т.е. способности системы сохранять память о предыдущих состояниях. В то же время данное свойство присуще именно интегральным уравнениям Вольтерра, с помощью которых можно все предыдущие состояния, в которых находилась система.

2) В работе рассматривалась по большей части не оптимизационная задача, а задача моделирования, т.е. определения состояния заряда накопителей, а задача оптимизации использовалась в качестве примера, в котором наш подход используется в качестве дополнительного инструмента.

3) Если в системе есть накопители энергии, то предлагаемые в диссертации математические модели можно применить к ним, так как они могут учитывать сам процесс аккумуляирования, независимо от того, что именно накапливается.

На заседании 14.09.2022 г. диссертационный совет принял решение за решение задачи разработки новых интегральных моделей и методов определения режимных параметров накопителей, имеющих существенное значение для развития электроэнергетики страны, присудить Муфтахову Ильдару Ринатовичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 6 докторов наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 3.

Председатель
диссертационного совета

Стенников Валерий Алексеевич

Ученый секретарь
диссертационного совета

Клер Александр Матвеевич

14.09.2022 г.