

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
математики и механики им.

Н.Н. Красовского Уральского отделения
Российской академии наук
(ИММ УрО РАН) академик РАН

Н. Ю. Лукоянов

« 10 » ноября 2025 г.

Отзыв

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН) на диссертационную работу Антипиной Екатерины Дмитриевны «Математическое моделирование нелинейных динамических систем с векторным входом в теплоэнергетике (численные методы, алгоритмы)», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

В диссертационной работе нелинейная модель динамической системы ищется в виде интегро-функциональных рядов Вольтерры с неизвестными функциями (ядрами). Проводятся специальные серии тестовых экспериментов по определению (идентификации) этих ядер. Полученная модель описывает поведение динамической системы и может использоваться как для дальнейшего управления системой, так и для оптимизации работы исходной динамической системы. Такого рода системы, в частности, возникают в технических объектах энергетики. Идентификация ядер сводится к решению серии уравнений Вольтерры I рода, для регуляризации которых используется метод саморегуляризации.

В диссертации рассмотрены новые постановки задач идентификации, доказаны теоремы разрешимости и единственности решения этих задач, построены новые разностные схемы решения задач идентификации, обладающих свойством саморегуляризации. Создано программное обеспечение, реализующее новые методы, и проведена апробация методов на моделировании отклика объектов теплоэнергетики на примере выходных изменения энтальпии

в элементе теплообменного аппарата и изменения температуры и давления в конденсаторе и подогревателе низкого давления пароводяного тракта энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт.

Актуальность темы исследования по дальнейшему развитию теоретических вопросов, разработке и совершенствованию программного обеспечения на основе использования нелинейных интегро-функциональных рядов Вольтерры с привлечением идей регуляризации и учета всей имеющейся априорной информации определяется необходимостью решения новых содержательных задач, связанных с моделированием нелинейных динамических систем с приложением к объектам теплоэнергетики.

Особую научную и практическую значимость имеют разработанные в работе методы решения новых классов многомерных уравнений Вольтерры I рода, которые позволяют с высокой точностью решать задачи идентификации ядер и восстановления входных сигналов для реальных теплоэнергетических объектов. Предложенные вычислительные алгоритмы ориентированы на применение в условиях нестационарных процессов и векторных входных сигналов, что соответствует современным требованиям к моделированию сложных технических систем.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- рассмотрены новые виды уравнений Вольтерры с двумя переменными пределами интегрирования; для этих уравнений обоснованы устойчивые алгоритмы идентификации нелинейных детерминированных систем с неполной априорной информацией;

- предложены модифицированные методы решения многомерных уравнений Вольтерры I рода для идентификации несимметричных ядер, учитывающие запаздывание измерительных сигналов и основанные на обобщении классического метода шагов на многомерный случай;

- изучены специальные типы СЛАУ в задаче численной идентификации квадратичного полинома Вольтерры в случае кусочно-линейных тестовых сигналов; для этого случая доказаны новые теоремы о разрешимости задачи восстановления векторного входного сигнала для нелинейных систем интегральных уравнений Вольтерры I рода;

- создан комплекс вычислительных алгоритмов, который расширяет функциональные возможности программно-вычислительных комплексов для моделирования нелинейной динамики энергетических объектов; методики и программное обеспечение апробировано на тестовых примерах в рамках численного моделирования нелинейной динамики теплотехнического

оборудования крупной электроэнергетической системы в случае векторного входного сигнала.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

1. Теоретические положения и доказательства основаны на применении хорошо изученного аппарата теории интегральных уравнений Вольтерры, некорректно поставленных задач, функционального анализа и процедурах дискретизации интегральных операторов.
2. О достоверности и обоснованности предложенных подходов свидетельствует практика успешного решения множества прикладных задач по моделированию работы объектов теплоэнергетики нелинейными рядами Вольтерры.
3. Верификация результатов проводилась на основе сравнения с эталонными решениями и данными натурных экспериментов.
4. Апробация выполнена на представительном числе российских и международных научных конференций.

Публикационная активность соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 14 работ, включая 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 7 публикаций в трудах конференций, индексируемых в Web of Science и Scopus, и 4 работы в других изданиях. Теоретические и прикладные разработки защищены 3 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие содержания диссертации автореферату и паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки). Содержание диссертации Антипиной Е.Д. полностью соответствует автореферату. Диссертация полностью соответствует паспорту специальности 1.2.2., в том числе следующим пунктам в формуле специальности:

Пункт 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений (физико-математические науки).

Пункт 2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

Пункт 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Личное участие соискателя в получении результатов, представленных в диссертации, выражается в следующем:

1. Разработка вычислительных методов и алгоритмов.
2. Реализация численных алгоритмов в виде программ для ЭВМ и верификация разработанного программного обеспечения. В частности, соискатель лично реализовал программно-вычислительный комплекс для численного решения интегральных уравнений Вольтерры.
3. Проведение вычислительных экспериментов в приложениях, включая моделирование динамики участка пароводяного тракта энергоблока Назаровской ГРЭС.
4. Получение теоретических результатов, связанных с полиномиальными интегральными уравнениями (совместно с научным руководителем).
5. Подготовка публикаций по теме диссертации, где личный вклад автора оценивается как весомый.
6. Формулировка и доказательство теорем, приведенных в диссертации.

Соавторами подтверждено, что конфликт интересов отсутствует. Текст диссертации не содержит заимствований без ссылок на первоисточники

Теоретическая значимость полученных результатов определяется тем, что моделирование нелинейными рядами Вольтерры позволяет удобно описать широкий круг нелинейных динамических систем, возникающих, в частности, в энергетике. Предложены и реализованы подходы, сочетающие в себе элементы хорошо изученных методов уравнений Вольтерры, разностных схем и решения некорректных задач. Впервые выделен новый класс нелинейных интегральных моделей на базе полиномиальных уравнений Вольтерры I рода, связанных с задачей идентификации переходных характеристик и восстановления входных сигналов. Доказана невырожденность соответствующих систем линейных алгебраических уравнений и исследованы качественные свойства численных решений новых классов уравнений Вольтерры I рода. Теоретически обоснованы модифицированные численные методы решения многомерных интегральных уравнений Вольтерры. Доказаны теоремы о разрешимости задач восстановления векторного входного сигнала для нелинейных систем интегральных уравнений Вольтерры I рода. Это позволило выполнить глубокую аналитическую проработку реализованных в диссертационной работе методов идентификации моделей на основе тестовых входных сигналов из класса кусочно-линейных функций, провести оценки достоверности выполненных построений.

Практическая значимость работы заключается в создании комплекса численных методов и алгоритмов идентификации ядер Вольтерры и восстановления входных сигналов, которые расширяют инструментальную базу для моделирования нелинейных динамических процессов в технических системах теплоэнергетики. Разработанное программное обеспечение, реализованное в виде модулей для программно-вычислительного комплекса, может быть использовано для моделирования переходных процессов в энергетических системах и решения задач управления и оптимизации режимов работы теплоэнергетических установок.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации. Результаты работы могут быть применены в научно-исследовательских организациях, занимающихся математическим моделированием энергетических систем, а также в образовательном процессе при подготовке специалистов в области прикладной математики и теплоэнергетики.

Общая характеристика диссертации. Автореферат с достаточной полнотой отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Е.Д. Антипиной состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 173 наименований и двух приложений. Общий объем работы составляет 142 страницы машинописного текста, иллюстрированного 18 рисунками и 13 таблицами.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи, положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость исследования.

Первая глава носит обзорно-постановочный характер. В ней проведен анализ современного состояния проблемы, рассмотрены теоретические основы применения полиномов Вольтерры для моделирования нелинейных динамических систем с векторным входом. Дана строгая математическая постановка задач идентификации ядер Вольтерры и восстановления входных сигналов, что закладывает теоретический фундамент для дальнейших исследований.

Вторая глава является центральной частью работы. В ней модифицированы и развиты численные методы решения новых классов многомерных интегральных уравнений Вольтерры I рода с двумя переменными пределами интегрирования. Главной заслугой соискателя является теоретическое доказательство теорем о разрешимости соответствующих систем линейных

алгебраических уравнений (СЛАУ) и обоснование сходимости разработанных методов дискретизации. В том числе проведено обоснование регуляризирующих свойств методов дискретизации на основе явления саморегуляризации.

Третья глава посвящена разработке программного обеспечения и вычислительному эксперименту. В ней описаны, реализованные соискателем специализированные алгоритмы, интегрированные в программно-вычислительный комплекс. Эффективность предложенных методов подтверждена результатами вычислительных экспериментов на тестовых примерах, продемонстрировавших работоспособность алгоритмов и повышение точности моделирования нелинейной динамики.

В **заключении** подведены итоги работы, сформулированы основные выводы и результаты, подтверждающие выполнение поставленных задач и достижение цели исследования.

Основные замечания и рекомендации

В качестве замечаний по работе можно сформулировать следующее:

1. В главе 3 пункт 3.1 посвящен обзору программных средств других авторов. При этом критерии обзора слишком широкие, в частности, упоминаются вычислительные платформы MATLAB, MathCAD и т.д. Программы соискателя никаким образом большинству средств, указанных в обзоре, не аналогичны и не конкурируют. В первом предложении речь идет о применении авторской методики, а ниже, в пункте 4 о классификации программных продуктов, об авторских пакетах. Например, можно сделать обзор программных средств моделирования нелинейных динамических систем, описание которых известно автору. Пусть это будет две-три программы, но они должны решать задачи аналогичные тем, которые может решать программное обеспечение соискателя.

2. В разделе, посвященном верификации алгоритмов, отсутствуют данные о временных характеристиках эксперимента: не указана продолжительность измерений и временной шаг дискретизации данных, что затрудняет воспроизведение результатов. Желательно уточнить этот момент.

3. В работе представлены либо полностью несимметричные ядра, либо полностью симметричные. Желательно внести дополнительное обоснование выбора полностью несимметричных ядер Вольтерры, а также пояснить возможные особенности применения частично симметричных ядер.

Представленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают положительной оценки диссертационной работы в целом. Диссертация Е.Д. Антипиной соответствует критериям, установленным Положением о

присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение по работе

Проведенный анализ диссертационной работы Антипиной Е.Д. позволяет заключить, что представленное исследование является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной проблемы в области математического моделирования нелинейных динамических систем. Автором получены новые научные результаты, имеющие существенное значение для развития методов идентификации и моделирования объектов теплоэнергетики.

Работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации, основные положения и выводы работы. Все представленные результаты получены лично соискателем и не содержат недостоверных данных.

Совокупность полученных результатов представляет собой значительный вклад в развитие математического моделирования нелинейных динамических систем с векторным входом. Разработанные методы и алгоритмы расширяют научный инструментарий в области идентификации и численного моделирования теплоэнергетических объектов.

Основные положения диссертации прошли апробацию в научных публикациях и на конференциях, соответствуют паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Вывод

Диссертационная работа Антипиной Екатерины Дмитриевны «Математическое моделирование нелинейных динамических систем с векторным входом в теплоэнергетике (численные методы, алгоритмы)» полностью удовлетворяет требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к кандидатским диссертациям, и ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв подготовлен

А.Л. Агеевым доктором физико-математических наук (научная специальность 01.01.07. – Вычислительная математика), главным научным сотрудником,

заведующим отделом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук и

Т.В. Антоновой доктором физико-математических наук (научная специальность 01.01.07. – Вычислительная математика), ведущим научным сотрудником Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук.

Настоящий отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на научном семинаре отдела некорректных задач анализа и приложений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, протокол № « 25 » от «10 » ноября 2025 г.

Главный научный сотрудник ИММ УрО РАН
заведующий отделом некорректных задач
анализа и приложений,
доктор физико-математических наук
ageev@imm.uran.ru



А.Л. Агеев

«10» ноября 2025 г.

Ведущий научный сотрудник ИММ УрО РАН
доктор физико-математических наук
«10» ноября 2025 г.



Т.В. Антонова

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН)

Адрес: 620108, Россия, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 16

Телефон: +7 (343) 374-83-32

Тел./факс: +7 (343) 374-25-81

Web: <https://www.imm.uran.ru>

E-mail: ageev@imm.uran.ru

Подписи А.Л. Агеева и Т.В. Антоновой заверяю:

Ученый секретарь ИММ УрО РАН, к. ф.-м. н.



Ульянов О.Н.