

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук
Рязанцева Владимира Андреевича
на диссертационную работу Спиряева Вадима Александровича
**«Интегральные модели динамических систем и
их приложения в теплоэнергетике»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ (технические науки)

Отзыв на диссертационную работу Спиряева Вадима Александровича
составлен в соответствии с п. 23 «Положения о присуждении ученых
степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г.
№ 842 (с дополнениями и изменениями), на основе изучения диссертации и
опубликованных соискателем работ по теме диссертации.

Актуальность темы диссертации

В последние годы в мировой энергетике характерен тренд к созданию интеллектуальных энергетических систем на основе инновационных технологических преобразований. Очевидно, что создание интеллектуальных энергосистем требует привлечения адекватных математических моделей, описывающих реальный объект или процесс. При этом адекватностью должны обладать как математические модели, так и эффективные вычислительные методы их построения. Математические модели динамических объектов включают в себя системы обыкновенных дифференциальных уравнений, конечномерные (алгебраические) уравнения и различные классы интегральных уравнений Вольтерра, объединение которых нередко приводит к качественно новым математическим объектам, описываемым, в том числе, интегральными уравнениями Вольтерра I рода с переменными пределами интегрирования и их системами. К настоящему моменту теоретический аппарат исследования обратных задач, в которых возникают неклассические уравнения вольтерровского типа, не полон и требует дальнейшего развития. Данная диссертационная работа нацелена на разработку математического аппарата и методов решения таких типов задач теории динамики систем. Таким образом, представленное в диссертации исследование является актуальным, а результаты имеют существенную теоретическую и практическую значимость.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня сокращений и обозначений, списка литературы и четырех приложений. По объему работа состоит из 182 страниц, иллюстративный материал включает 74 рисунка и 5 таблиц. Библиография насчитывает 187 наименований.

Во *введении* автор дает обоснование актуальности исследования, представляет обзор литературы по направлению исследования. Формализуется цель и основные задачи работы, характеризуется степень новизны полученных результатов.

В *первой главе* автор дает обзор методов идентификации для математического моделирования нелинейных динамических систем типа «вход-выход» с помощью полиномов Вольтерра и обзор по применению преобразования Гильберта – Хуанга (ПГХ) для анализа временных рядов из различных областей исследования.

Во *второй главе* автор описывает предметную область и особенности динамики исследуемых энергетических объектов. Также здесь приведены постановки задач, связанных с анализом и моделированием динамики этих объектов.

В *третьей главе* дана информация о математических результатах, касающихся решения задач идентификации переходных характеристик и сигналов для математических моделей виде квадратичных и кубичных полиномов Вольтерра. Приведены результаты, связанные с решением задачи идентификации с помощью ПГХ.

В *четвертой главе* приводятся результаты численного решения тестовых задач и анализ полученных результатов. Дана информация об использованных программных средствах. Представлены результаты для тестовой математической системы, а также для двух теплоэнергетических объектов: теплообменного аппарата и участка Назаровской ГРЭС. Показано применение численного метода интегрирования произведения (ИП) для решения квадратичного уравнения и приведены результаты по использованию ПГХ для идентификации механизмов пульсаций давления.

В *заключении* приводятся основные результаты работы.

В *приложении* приводится иллюстративный материал, формулировки и доказательства теорем, а также копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и копия акта о внедрении результатов диссертации.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в разработке нового подхода к решению задачи построения математических моделей на основе полиномов Вольтерра, способного преодолеть недостатки, присущие методу идентификации ядер Вольтерра. Здесь ставится новая задача непараметрической идентификации, ключевое отличие которой состоит в обобщении численного метода ИП для восстановления многомерных интегралов от симметричных ядер Вольтерра. Задача идентификации входного сигнала динамических систем, представленных в виде полиномов Вольтерра, сведена к новым классам полиномиальных интегральных уравнений Вольтерра I рода. На основе обобщенного метода ИП построена численная схема решения такой задачи и проведено тестирование, показавшее работоспособность предложенного подхода в целом. Исследована целесообразность и даны практические рекомендации применения ПГХ для анализа временных рядов, полученных в ходе физических экспериментов на Центре коллективного пользования «Высокотемпературный контур» (ЦКП ВТК) ИСЭМ СО РАН.

Теоретическая и практическая ценность работы

Теоретическая ценность исследования определяется тем, что разработаны и обоснованы методы идентификации квадратичного и кубического полиномов Вольтерра для построения математической модели нелинейной динамической системы, допускающей применение скалярных кусочно-постоянных тестовых входных сигналов с помощью численного метода ИП; рассмотрены новые специальные классы полиномиальных уравнений Вольтерра I рода, для которых получены неулучшаемые оценки некоторых нелинейных интегральных неравенств, связанных с задачей восстановления входных сигналов; применено модифицированное ПГХ в задаче автоколебательных пульсаций давления, позволяющее провести идентификацию частот, которые характеризуют определенные механизмы автоколебательных пульсаций давления.

Практическая ценность работы подтверждается тем, что:

- разработана универсальная методика, позволяющая строить математические модели исследуемой динамической системы в виде полиномов Вольтерра второй и третьей степени для случая скалярных входных сигналов;

- построена численная схема на основе метода ИП для решения квадратичного интегрального уравнения, позволяющая согласовать решение задач автоматического управления и идентификации модели;
- развит подход, позволяющий выбирать между классической версией ПГХ и его модификацией, для более точной идентификации несущих частот автоколебательных пульсаций давления;
- разработан программный комплекс, предназначенный для численного моделирования динамических систем различной природы;
- предлагаемая методика и программный комплекс протестированы и отлажены на тестовой математической системе и применены для теплотехнических объектов, таких как имитационная модель теплообменного аппарата и цифрового двойника участка энергоблока Назаровской ГРЭС.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

При решении поставленных задач моделирования и идентификации использован строгий математический аппарат: теория дифференциальных и интегральных уравнений, теория некорректных задач, функциональный анализ, элементы вычислительной математики, линейной алгебры и комбинаторики.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается соответствующими математическими теоремами. Корректное применение разработанного математического аппарата продемонстрировано при решении модельных (тестовых) задач и при расчетах с реальными экспериментальными данными, которые допускают естественную физическую интерпретацию.

Оценка содержания диссертации и автореферата

Текст диссертации изложен грамотным научным языком, структурирован и полностью соответствует критериям, установленным ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для диссертаций, представленных на соискание ученой степени кандидата наук. Работа имеет законченный характер. Результаты диссертационного исследования соответствуют пунктам 2, 3, 8 паспорта специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Имеются принципиально новые результаты из трех областей, входящих в название научной специальности. Отрасль научных исследований – техническая.

Предъявляемые в п. 13 «Положения о присуждении ученых степеней» требования к кандидатским диссертациям и публикациям основных

результатов исследования соблюдены. По теме диссертации опубликовано 29 научно-исследовательских работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по научной специальности 1.2.2. (технические науки), 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК по прочим специальностям, 2 статьи, индексируемые в международной базе данных Scopus, и 1 статья в международной базе данных Web of Science. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях (в том числе международных).

Замечания по работе:

1. В работе исследован случай численного решения квадратичного уравнения Вольтерра I рода с помощью метода интегрирования произведения. Представляют интерес исследования, касающиеся кубичных уравнений.

2. В главе 3 достаточно места уделено теоретическому исследованию полиномиальных уравнений Вольтерра I рода, связанных с задачей идентификации входных сигналов. Практическое применение проиллюстрировано при исследовании области существования их решения. При этом предполагалось, что динамическая система является разомкнутой. Обязательно ли нужно использовать именно это предположение?

В целом, указанные замечания не умаляют высокой оценки диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для диссертаций, представленных на соискание ученой степени кандидата наук

Диссертация Спиряева Вадима Александровича «Интегральные модели динамических систем и их приложения в теплоэнергетике» по объему, содержанию и качеству выносимых на защиту результатов представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая заключается в разработке математических моделей, методов и алгоритмов решения задач моделирования и идентификации нелинейных динамических систем теплоэнергетики во временной области и имеет важное значение для развития

теории и приложений обратных задач динамики систем, представленных с помощью аппарата интегро-степенных рядов Вольтерра.

Полученные автором результаты достоверны, а выводы и заключения обоснованы. Автореферат в пределах своего объема соответствует тексту работы, правильно отражает содержание диссертации и основные положения, вынесенные на защиту.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Спириева Вадима Александровича «Интегральные модели динамических систем и их приложения в теплоэнергетике», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (с изменениями и дополнениями), которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата наук.

Считаю, что автор рассматриваемой диссертации, Спириев Вадим Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
ПФ АО «НТЦ «Атлас»

 /
Рязанцев Владимир Андреевич

«15» августа 2023 г.

Наименование организации: Пензенский филиал акционерного общества «Научно-технический центр «Атлас» (ПФ АО «НТЦ «Атлас»)

Почтовый адрес: 440028, г. Пенза, пр. Победы, 69, к. 2

Телефон: +7 (8412) 64-38-63.

Эл. почта: <http://atlas.sura.ru/>, atlas@atlas-pf.ru

Подпись Рязанцева В.А. заверяю

И.о. директора организации

 /
Кузнецов Станислав Евгеньевич

