

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора
Сизикова Валерия Сергеевича
на диссертационную работу Спиряева Вадима Александровича на тему
**«Интегральные модели динамических систем и
их приложения в теплоэнергетике»**,
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Целью диссертационной работы Спиряева В.А. является разработка математических методов расчета интегральных моделей на основе уравнений Вольтерра I рода, создание новых численных алгоритмов и программного пакета, предназначенных для единой методики численного моделирования динамики объектов теплоэнергетических установок и анализа реальных данных для переходных процессов.

Актуальность избранной темы диссертации. Среди широкого класса обратных прикладных задач можно выделить *задачи непараметрической идентификации* (восстановление импульсной функции по входному и выходному сигналам). Из-за инерционности динамической системы, включающей исследуемый объект и измерительное устройство, ее переходные характеристики не являются δ -функциями. Поэтому возникает *обратная задача восстановления входных сигналов*. К обратным задачам можно отнести и *задачу идентификации импульсной функции* динамической системы по зарегистрированным значениям входного и выходного сигналов. В отечественной литературе для таких задач используется термин *обратные измерительные задачи*, что подчеркивает использование для их решения экспериментальных (измерительных) данных. Такие задачи часто возникают при описании нелинейного объекта моделью типа «черного ящика» в виде интегрального полинома Вольтерра. Перечисленные задачи при этом могут быть сведены к решению интегральных уравнений Вольтерра I рода, которые относятся к классу *некорректно поставленных задач* (решение таких задач может не существовать или не быть единственным решением, а также может отсутствовать непрерывная зависимость решения от исходных данных, т.е. решение может быть неустойчивым). Для решения некорректных задач используются *методы регуляризации*.

Рассмотренные в диссертации классы интегральных уравнений Вольтерра I рода относятся к *условно корректным задачам*, которые допускают в случае, когда погрешность входной информации выводит решение за пределы множества корректности, применение *методов саморегуляризации* (где шаг сетки является естественным параметром регуляризации). Очевидно, что разработка новых методов моделирования на основе устойчивых алгоритмов с учетом идей саморегуляриза-

ции является важной и актуальной задачей. Основой диссертационной работы является моделирование динамических систем с использованием полиномов Вольтерра второй и третьей степени на основе решения обратных измерительных задач с помощью *обобщенного метода интегрирования произведения* (ИП).

Структура и содержание работы. Текст диссертационной работы включает введение, четыре главы, заключение, перечень сокращений и обозначений, список использованной литературы и четыре приложения. По объему работа состоит из 182 страниц, иллюстративный материал состоит из 74 рисунков и 5 таблиц. Библиография насчитывает 187 наименований.

Введение дает общую характеристику работы. В нем обоснована актуальность исследования, подробно сформулирована исследуемая проблема. Изложены цели и задачи диссертации, представлены основные положения, выносимые на защиту. В конце Введения представлены научная новизна и практическая значимость результатов, а также уровень достоверности и апробация результатов, заключающиеся в публикациях в ведущих научных журналах и выступлениях на международных конференциях.

В *первой главе* дается анализ литературных источников по теме исследования. Систематизирован материал, посвященный методам идентификации для математического моделирования нелинейных динамических систем типа «вход-выход» с помощью полиномов Вольтерра. Приводится обзор по применению преобразования Гильберта–Хуанга (ПГХ) для анализа временных рядов из различных областей исследований.

Во *второй главе* описывается предметная область и особенности динамики энергетических объектов, которые рассматриваются в диссертации.

Третья глава посвящена математическим результатам диссертации. В главе собраны результаты, касающиеся решения задач идентификации переходных характеристик и сигналов. Приведены результаты, связанные с изучением полиномиальных интегральных уравнений Вольтерра I рода. Показаны различные аспекты, связанные с ПГХ.

Четвертая глава посвящена результатам применения численных методов и реализации предлагаемых алгоритмов в виде программных комплексов. Представлены результаты по моделированию тестовой математической системы, теплообменного аппарата и участка Назаровской ГРЭС. Показано применение численного метода ИП для решения квадратичного уравнения и приведены результаты по использованию ПГХ для идентификации механизмов пульсаций давления.

В *заключении* автор кратко повторяет основные результаты диссертационной работы. *Приложение* содержит формулировки и доказательства теорем, а также копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и копию акта о внедрении результатов диссертации.

Новизна полученных результатов и выводов. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих основных *результатах*:

1. В основе диссертации лежит методика *непараметрической идентификации* математических моделей типа «вход–выход» в виде квадратичных и кубических полиномов Вольтерра. Ключевое отличие состоит в обобщении численного метода ИП для восстановления многомерных интегралов от симметричных ядер.

2. Исследованы новые классы полиномиальных интегральных уравнений Вольтерра I рода.

3. Показано удачное применение метода интегрального произведения (ИП) для численного решения квадратичного уравнения Вольтерра I рода.

4. Исследована целесообразность и даны практические рекомендации по применению преобразования Гильберта–Хуанга (ПГХ) к анализу временных рядов, полученных в ходе физических экспериментов в Центре коллективного пользования «Высокотемпературный контур» (ЦКП ВТК) ИСЭМ СО РАН.

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов. *Теоретическая ценность* исследования определяется тем, что разработаны методы идентификации квадратичного и кубического полиномов Вольтерра в случае скалярного входного воздействия с помощью численного метода ИП; приведена техника обоснования применения метода ИП для идентификации математической модели нелинейной динамической системы, допускающей применение кусочно-постоянных тестовых входных сигналов; 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 помимо тестовой математической системы также на теплотехнических объектах, таких как имитационная модель теплообменного аппарата и цифрового двойника участка энергоблока Назаровской ГРЭС.

Соответствие содержания диссертации автореферату и паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки). Диссертация Спиряева В.А. полностью соответствует паспорту специальности 1.2.2., в том числе следующим пунктам в формуле специальности:

1. Пункту 2 области исследований специальности ВАК 1.2.2. «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»;

2. Пункту 3 области исследований специальности ВАК 1.2.2. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»;

3. Пункту 8 области исследований специальности ВАК 1.2.2. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Имеются принципиально новые результаты из трех областей:

- **Математическое моделирование.** Разработана методология построения математических моделей в виде полиномов Вольтерра на основе обобщения метода ИП;

- **Численные методы.** Предложен численный метод на основе обобщения метода ИП для задачи идентификации и моделирования нелинейных динамических систем типа «вход–выход»; метод ИП применен для решения квадратичного интегрального уравнения.

- **Комплексы программ.** Разработан и реализован программный комплекс для решения задач идентификации и моделирования динамики цифрового двойника энергоблока Назаровской ГРЭС и имитационной модели элемента теплообменной установки; разработана программа для применения ПГХ и модифицированного ПГХ (со своими параметрами) для анализа временных рядов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Научные результаты, представленные в диссертации, обоснованы правильным применением теории интегральных и дифференциальных уравнений, теории некорректных задач, аппарата функционального анализа, вычислительной математики, линейной алгебры и комбинаторики.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается соответствующими математическими выкладками, сформулированными в виде теорем. Эффективное применение разработанного математического аппарата продемонстрировано при решении модельных (тестовых) задач и при расчетах с использова-

нием реальных экспериментальных данных, которые допускают естественную физическую интерпретацию.

Кроме того, *обоснованность* подтверждается представлением результатов на международных конференциях и публикацией в ведущих научных изданиях.

Оценка изложения материала диссертации и автореферата. Материал, написанный в диссертации, понятен, логичен, хорошо структурирован. Проведенные исследования можно считать завершенными. Результаты, полученные в диссертации, являются новыми. Диссертация написана в форме, позволяющей получить полное и достаточно подробное представление о материалах исследований, проведенных автором. Оформление работы аккуратное и соответствует установленным требованиям. Автореферат полностью соответствует содержанию работы.

Основные замечания по диссертации и автореферату. В качестве *замечаний* по работе можно сформулировать следующие:

1. Почему в работе используется термин «непараметрическая идентификация», хотя используется ПГХ с параметрами, параметр регуляризации α , а также степень полинома N (как параметр) и др.?

2. В третьей главе приведен вариант формул обращения для построения квадратичной модели с использованием другого *дополнительного* (обучающего) сигнала. Однако каких-либо численных расчетов и результатов сравнения с этим дополнительным сигналом не приведено.

3. Теплотехнические объекты, используемые автором для демонстрации предлагаемой методики построения математических моделей, представлены в виде имитационных моделей или цифровых двойников реальных объектов. Автор рассмотрел ситуацию, когда сигналы динамических систем заданы *без шума*. В то же время на практике шумовая составляющая обычно присутствует. Поэтому интересно изучить представленную методику при зашумлении исходных данных.

Высказанные замечания не снижают общей высокой оценки работы в целом.

Заключение. Работа выполнена на высоком научном уровне и представляет значительный интерес для специалистов в области численного моделирования динамики энергетических объектов. Диссертация автора «Интегральные модели динамических систем и их приложения в теплоэнергетике» полностью соответствует специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой предложены новые модели в виде интегральных уравнений Вольтерра I рода, устойчивые численные методы решения обратных измерительных задач и выполненный автором комплекс программ для моделирования нелинейной динамики теплотехнических устройств во временной области.

Основные результаты диссертации опубликованы в 29 научных статьях. К числу наиболее значимых относятся 4 статьи в журналах из перечня ВАК, в том

числе 2 статьи – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по научной специальности 1.2.2. (технические науки), а также 3 статьи, индексируемые в международных базах Scopus/Web of Science. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Считаю, что диссертационная работа Спиряева Вадима Александровича «Интегральные модели динамических систем и их приложения в теплоэнергетике» по актуальности, ценности полученных результатов, научной новизне, практической значимости и объему в полной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, отвечает требованиям п.п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (с изменениями и дополнениями), а ее автор, Спиряев В.А., заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

Доктор технических наук, профессор,
профессор факультета Программной инженерии и компьютерной техники
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Сизиков Валерий Сергеевич

« 15 » августа 2023 г.

Подпись д.т.н. Сизикова Валерия Сергеевича удостоверяю.

Проректор по научной работе Университета ИТМО,

д.т.н., профессор Никифоров В.О.



Полное название организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО)

Адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49, лит. А.

Телефон: +7(812)232-87-85, <http://www.itmo.ru>, e-mail: od@itmo.ru