

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук (ИПУ РАН),
доктор технических наук, академик РАН

Д.А. Новиков

«21 мая» 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) – 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.

Актуальность темы исследования заключается в разработке эффективной методики построения математических моделей типа «вход-выход» на основе интегральных уравнений, объединяющих решения обратных задач идентификации переходных характеристик и восстановления входных сигналов динамических систем в теплоэнергетике.

Цифровая трансформация энергетики стимулирует разработку математического инструментария для анализа и моделирования нелинейных динамических систем. Основой этого инструментария является разработка методов непараметрической идентификации и создания на их основе программных комплексов для моделирования в области инженерных приложений. Как правило, технические системы являются довольно сложными объектами, структура которых может быть неизвестна, так что исследование их причинно-следственных связей по наблюдаемым входным и выходным воздействиям представляется единственным возможным способом построения модели. Актуальность и практическая значимость диссертации не вызывают сомнения.

Общая характеристика диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня сокращений и обозначений, списка литературы из 187 источников и четырех приложений. Общий объем работы составляет 182 страницы машинописного текста, иллюстрированного 74 рисунками и 5 таблицами.

Во *введении* обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* приведен обзор современных методов идентификации нелинейных динамических процессов типа «вход-выход» с помощью конечных отрезков интегро-степенного ряда (полиномов) Вольтерра. Показаны достоинства и недостатки существующих подходов к построению математических моделей на основе данного аппарата. Приводится обзор по применению преобразования Гильберта-Хуанга (ПГХ) для анализа временных рядов. Описана специфика слабо неустойчивых задач, помогающая выявить проблемы и узкие места в применимости имеющихся подходов к решению поставленных задач.

Во *второй главе* конкретизируется предметная область и особенности динамики энергетических объектов, которые рассматриваются в диссертации. Представлены результаты, касающиеся разработки концепции решения задач непараметрической идентификации и моделирования тестовых динамических систем.

В *третьей главе* систематически разработаны математические аспекты аппарата для исследования обратных задач теории динамических систем и его применение к управляемым системам. Акцент сделан на задачах идентификации переходных характеристик и сигналов на основе полиномов Вольтерра второй и третьей степени.

Четвертая глава содержит описание разработки и реализации программных комплексов. Представлены убедительные результаты численных экспериментов по моделированию тестовой математической системы, динамики теплообменного аппарата и локального участка теплотехнического оборудования энергоблока Назаровской ГРЭС. Приведены результаты по использованию ПГХ для идентификации механизмов пульсаций давления.

В *заключении* приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В приложениях приводится иллюстративный и справочный материал, а также свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и копия акта о внедрении результатов диссертационного исследования.

Текст диссертации характеризуется логичностью изложения, материал исследования обладает внутренним единством и хорошо структурирован. По объему, структуре и оформлению диссертационная работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Новизна полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации. Научной новизной обладают полученные автором теоретические и практические результаты по решению обратных задач, полученные в рамках единого подхода к идентификации и моделированию динамических систем. С предложенными в диссертации и автореферате формулировками научной новизны согласны, в качестве наиболее значимых результатов отметим:

1. Эффективный метод непараметрической идентификации математических моделей типа «вход-выход» в виде квадратичных и кубичных полиномов Вольтерра. Новизна состоит в обобщении численного метода интегрирования произведения (ИП) для восстановления многомерных интегралов от симметричных ядер.

2. Численный метод решения полиномиальных интегральных уравнений Вольтерра I рода, возникающих в задаче идентификации входных сигналов. Преимущество предложенных автором подходов состоит в оценке предельных возможностей вычислительных алгоритмов за счет введения специальных мажорантных уравнений.

3. Методические рекомендации по применению преобразования Гильберта-Хуанга для анализа временных рядов, полученных в ходе физических экспериментов в Центре коллективного пользования «Высокотемпературный контур» (ЦКП ВТК) ИСЭМ СО РАН.

Предлагаемые в работе Спиряева В.А. алгоритмы являются оригинальными. Они реализованы в виде программного комплекса, что подтверждается наличием двух свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

- теоретические результаты для динамических моделей на базе уравнений Вольтерра I рода основаны на применении теории дифференциальных и интегральных уравнений, теории некорректных задач,

аппарата функционального анализа, вычислительной математики, линейной алгебры, комбинаторики;

- численные методы базируются на процедурах дискретизации интегральных операторов (квадратуре средних прямоугольников и методе ИП), обладающих свойством саморегуляризации;

- результаты идентификации несущих частот автоколебаний давления, полученные с помощью ПГХ, соответствуют определенным механизмам автоколебательных пульсаций давления.

Все защищаемые положения сформулированы корректно и достаточно обоснованы не только теоретическими результатами автора, но и проведенными им численными экспериментами, в том числе на реальных данных.

Апробация работы и публикации. 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, 3 статьи, индексируемые в международных базах данных Scopus и/или Web of Science. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Автор в достаточной мере провел апробацию результатов работы и участвовал с докладами на научно-технических семинарах, всероссийских и международных конференциях, тематика которых соответствует заявленной специальности и отрасли приложений.

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

1. Пункту 2 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий» соответствуют следующие научные результаты:

- Подход к построению квадратичной и кубической математических моделей для цифровых двойников теплотехнического оборудования, основанный на идентификации интегралов от ядер Вольтерра с помощью многомерного метода ИП.

- Техника обоснования применения многомерного метода ИП для идентификации математической интегральной модели нелинейной динамической системы типа «вход-выход».

2. Пункту 3 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» соответствуют следующие научные результаты:

- Применение численного метода ИП для решения квадратичного уравнения Вольтерра I рода в случае, когда известны не сами ядра, а интегралы от них. Развитие подхода для получения неулучшаемых оценок решений полиномиальных уравнений Вольтерра I рода.

- Реализация разработанных алгоритмов в виде ПК для построения квадратичной и кубической моделей для исследования динамики давления и температуры в энергоблоке Назаровской ГРЭС. Реализация модуля идентификации полиномов Вольтерра второй и третьей степени, входящего в ПВК «Динамика», для исследования динамики элемента теплообменной установки.

3. Пункту 8 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» соответствуют следующие научные результаты:

- Подход к построению квадратичной и кубической математических моделей, основанный на идентификации интегралов от ядер Вольтерра с помощью многомерного метода ИП.

- Реализация разработанных алгоритмов в виде ПК для построения квадратичной и кубической моделей для исследования динамики давления и температуры в энергоблоке Назаровской ГРЭС. Реализация модуля идентификации полиномов Вольтерра второй и третьей степени, входящего в ПВК «Динамика», для исследования динамики элемента теплообменной установки.

- Подход, позволяющий выбрать между классической версией ПГХ и его модификацией, учитывая параметры этой модификации. Применение модифицированного ПГХ для идентификации несущих частот автоколебательных пульсаций давления.

В диссертационной работе присутствуют оригинальные результаты из трех областей: математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает основные идеи, результаты, выводы и положения диссертационной работы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- разработаны методы идентификации квадратичного и кубического полиномов Вольтерра в случае скалярного входного воздействия с помощью численного метода ИП;

- развита техника обоснования применения метода ИП для идентификации математической модели нелинейной динамической системы типа «вход-выход», допускающей применение кусочно-постоянных тестовых входных сигналов (доказательство невырожденности СЛАУ, оптимизация амплитуд сигналов и т.д.);

- введены специальные классы полиномиальных уравнений Вольтерра I рода, 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 состоит в приведении разработанных методов построения интегральных моделей на базе полиномов Вольтерра к уровню вычислительных технологий. Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработана универсальная методика построения математических моделей типа «вход-выход» в виде полиномов Вольтерра второй и третьей степени для случая скалярных входных сигналов;

- построена численная схема 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;

- разработано программное обеспечение, предназначенное для численного моделирования динамических систем на основе решения задачи идентификации переходных характеристик.

- представлены результаты тестирования универсальных модулей разработанного программного комплекса для описания динамики элемента установки ЦКП ВТК ИСЭМ СО РАН и динамики элементов

теплотехнического оборудования энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт.

Научные положения, выносимые на защиту, подкреплены теоретическими результатами и экспериментальными данными.

Замечания по диссертационной работе

По содержанию диссертации возникли следующие вопросы и замечания:

1. Во второй главе было бы целесообразно представить технологии проведения самого эксперимента при описании динамики давления в теплофизических процессах.

2. В третьей главе диссертации рассматривается задача оптимизации амплитуд тестовых сигналов в задаче идентификации интегралов от ядер Вольтерра для полиномов второй и третьей степени. Результаты проиллюстрированы на примере динамической системы. Каковы возможности использования полученных результатов применительно к тестовым теплоэнергетическим системам и объектам, описанным в диссертационной работе?

3. В четвертой главе, посвященной характеристике программных комплексов, было бы уместно привести описание интерфейса.

4. В работе не приведены результаты анализа временных затрат на вычисления и скоростных характеристик процессора ЭВМ, на которой были реализованы вычислительные эксперименты.

Следует отметить, что сделанные замечания носят редакционный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования.

Заключение

Диссертационная работа Спиряева Вадима Александровича «Интегральные модели динамических систем и их приложения в теплоэнергетике» по своему содержанию, результатам и оформлению является законченной научно-квалификационной работой, которая соответствует пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (с

изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

В диссертационной работе автором решена важная для развития энергетической отрасли задача, а именно разработка и реализация математического, алгоритмического и программного обеспечения для численного моделирования нелинейной динамики теплотехнических устройств во временной области с помощью полиномов Вольтерра. Диссертация написана автором самостоятельно и представляет законченное исследование, содержащее значимые научные результаты и положения. У диссертанта отсутствует конфликт интересов с соавторами по публикациям и свидетельствам о государственной регистрации программ для ЭВМ. Из совместных работ в диссертацию включены лишь те результаты, которые непосредственно принадлежат соискателю.

Автореферат соответствует тексту работы, правильно отражает основные научные и практические результаты диссертации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем результатах. Тематика и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Основные результаты, выносимые на защиту, прошли серьезную апробацию, полностью опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Вывод

Исходя из актуальности, новизны, научной и практической значимости представленной работы, можно сделать заключение, что диссертация «Интегральные модели динамических систем и их приложения в теплоэнергетике», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, является законченным научным исследованием и выполнена на высоком научном уровне. Она 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. Ее автор, Спиряев Вадим Александрович, **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата технических наук по этой специальности.

Отзыв подготовлен доктором технических наук (научная специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)), главным научным сотрудником Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, профессором Бахтадзе Натальей Николаевной.

Настоящий отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на научном семинаре лаборатории № 41 «Идентификация систем управления» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, протокол № «1 » от «18» июля 2023 г.

Главный научный сотрудник ИПУ РАН,
заведующий лабораторией «Идентификация систем управления»,
доктор технических наук, профессор
+7(495) 198-17-20, bahfone@ipu.ru

Бахтадзе Н.Н.

« 19» июля 2023 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ФГБУН ИПУ РАН).

Адрес: 117997, ГСП-7, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65.

Тел./факс +7(495)334-89-10; Электронная почта: dan@ipu.ru;

Сайт: <https://www.ipu.ru>

Я, Бахтадзе Наталья Николаевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Спиряева Вадима Александровича, и их дальнейшую обработку.

Подпись
Бахтадзе Н.Н.
Зав
Лью
ИПУ
ПРОБЛЕМ
УПРАВЛЕНИЯ
ИМ.
В.А.
ТРАПЕЗНИКОВА
РАН