

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Сизикова Валерия Сергеевича

на диссертационную работу **Солодуша Светланы Витальевны**

«Методы построения интегральных моделей динамических систем:

алгоритмы и приложения в энергетике»,

представленную на соискание учёной степени доктора технических наук

по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование,

численные методы и комплексы программ

Целью диссертационной работы Солодуша С.В. является разработка и развитие математических методов построения интегральных моделей в виде уравнений Вольтерра I рода, создание новых численных алгоритмов и программного комплекса, предназначенных для исследования процессов при регулировании отклика многовыходовых нелинейных динамических объектов тепло- и электроэнергетики.

Актуальность диссертационной работы обусловлена, с одной стороны, важностью развития методов управления режимами локальных энергетических объектов в современных условиях реструктуризации энергетики, а с другой стороны – привлечением неклассических интегральных уравнений Вольтерра I рода для описания динамических процессов типа «вход-выход», когда применение дифференциальных уравнений может быть затруднено, например, в процессе эксплуатации действующего энергетического объекта.

В настоящее время построено довольно много подходов к математическому моделированию нелинейных динамических систем, использующих аппарат интегро-степенных рядов Вольтерра. Однако их практическое применение приводит к обратным задачам – идентификации переходных характеристик и восстановлению входного сигнала, решение которых связано с известными трудностями. Поэтому **диссертация** Солодуша С.В., в которой с учетом идей вольтерровых регулирующих процедур Апарцина А.С. и Бакушинского А.Б. развита технология математического моделирования, разработаны эффективные численные алгоритмы и быстродействующий программный комплекс, **актуальна** и с прикладной, и с теоретической точек зрения.

Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов. Научная новизна диссертационной работы Солодуша С.В. состоит в том, что для случая векторного входного сигнала разработана концепция численного моделирования систем автоматического регулирования нелинейной динамики объектов тепло- и электроэнергетики с помощью полиномов Вольтерра, основанная на решении сопряженных задач непараметрической идентификации и деконволюции. Этапы решения данных задач базируются на полученных автором результатах, которые включают:

1. Оригинальную методику декомпозиции отклика, отличающуюся использованием необходимых условий разрешимости неклассических уравнений Вольтерра I рода с переменными верхним и нижним пределами интегрирования.

2. Новый метод идентификации полиномов Вольтерра, отличающийся восстановлением интегралов от ядер и использованием обобщения численного метода интегрирования произведения (Product Integration).

3. Математические модели на основе полиномиальных уравнений Вольтерра I рода второй и третьей степени и их систем, отличающиеся учетом возмущающих входных воздействий.

4. Модифицированные численные методы решения выделенных новых классов полиномиальных уравнений Вольтерра I рода, основанные на применении квадратур средних (правых) прямоугольников, метода Product Integration и метода Ньютона–Канторовича.

5. Эффективные алгоритмы моделирования нелинейной динамики элемента теплообменной установки с помощью полиномов Вольтерра, отличающиеся учетом нестационарных свойств динамических объектов и областей применимости интегральных моделей, построение которых основывалось на идентификации ядер Вольтерра и интегралов от них.

6. Использование выявленных параметрических связей и асимптотических оценок при реализации численного решения нового класса линейных интегральных уравнений Вольтерра I рода, связанного с граничной обратной задачей теплопроводности (ОЗТ).

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Выполненное в работе обоснование научных положений основывается на использовании теории некорректных задач, теории дифференциальных и интегральных уравнений, аппарата функционального анализа, системного анализа, различных областей вычислительной математики, линейной алгебры. Достоверность аналитических и численных результатов подтверждается сопоставлением с известными результатами применительно к классическим интегральным уравнениям Вольтерра I рода, а также сопоставлением их с численными результатами других авторов.

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов. Ценность для научной теории состоит в создании, модификации и комплексном исследовании методов и моделей на базе интегральных уравнений Вольтерра для описания динамики элементов теплообменных установок, в том числе на высокотемпературном контуре (ВТК) ИСЭМ СО РАН и участке энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт, а также ветроэнергетической установки (ВЭУ) с горизонтальной осью вращения.

В диссертационной работе развиваются теоретические знания и технологии идентификации полиномов Вольтерра для случая векторного входа с помощью

специальных семейств кусочно-постоянных сигналов. Введены новые классы полиномиальных интегральных моделей, возникающие в задаче восстановления входных сигналов.

Практическая значимость работы заключается в доведении разработанных методов построения интегральных моделей на базе уравнений Вольтерра I рода до уровня вычислительных технологий, подтвержденных при тестировании различных динамических систем и реализованных в виде проблемно-ориентированного программного комплекса «Динамика». Программные средства зарегистрированы в Роспатенте РФ.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Разработанные в диссертационной работе математические методы идентификации полиномов Вольтерра с векторными входными сигналами, численные алгоритмы решения задачи деконволюции, сформулированной в виде полиномиального уравнения Вольтерра I рода, и программное обеспечение, созданное на их основе, могут найти применение при проектировании тепло- и ветроэнергетических установок. Алгоритмы численного решения нового класса линейных уравнений Вольтерра I рода, возникающих в граничной ОЗТ, применимы при компьютерном моделировании принципов измерения для датчика температуры теплоносителя. Разработанная в диссертационной работе вычислительная технология позволяет учесть нестационарные свойства динамических объектов и систем тепло- и ветроэнергетики, повысить точность методов обработки результатов температурных измерений при компьютерном моделировании, а также может послужить основой при проведении поисковых и прикладных работ в научно-исследовательских учреждениях в части разработки математического и программного обеспечения. Кроме того, результаты диссертационной работы могут быть использованы при обучении студентов университетов технического профиля по дисциплинам, посвященным математическому моделированию и моделированию систем.

Публикации. По профилю диссертации и заявленной научной специальности опубликованы 44 научные работы, из которых 12 публикаций – в российских журналах, рекомендованных ВАК РФ, 24 публикации – в изданиях, индексируемых Scopus и (или) Web of Science и 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ Роспатента РФ.

Апробация результатов работы. Основные результаты и научные положения диссертационной работы были получены при выполнении проектов РФФИ № 99-01-00116, № 02-01-00173, № 05-01-00336, № 09-01-00377, № 12-01-00722, № 15-01-01425, при поддержке Лаврентьевского гранта для молодых ученых СО РАН (Постановление Президиума СО РАН № 404 от 06.12.2002) и в рамках программы фундаментальных исследований СО РАН, проект № АААА-А17-117030310446-6. Результаты исследования представлены, обсуждены в докладах на международных, всероссийских конференциях и симпозиумах, получили положи-

тельную оценку на научных семинарах в ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН (г. Москва); СПбГУ, Университете ИТМО (г. Санкт-Петербург), ИММ им. Н.Н. Красовского УрО РАН (г. Екатеринбург), ПГУ (г. Пенза) и др.

Оформление диссертации. Оформление диссертационной работы отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям. Автореферат достаточно полно отражает суть поставленных диссертантом задач и пути их решения, а также структуру и основные результаты диссертации.

Оценка основного содержания диссертации. Содержание диссертации отражено во введении, пяти главах, заключения, списка использованных источников и трех приложениях. Общий объем работы включает 353 страниц, 300 из которых – основной текст, содержащий 93 рисунка и 39 таблиц. Список использованной литературы включает 421 наименование.

В первой главе конкретизируется предметная область, модели и задачи, исследованию которых посвящена настоящая работа. Приводится обширный аналитический обзор методов математического моделирования нелинейных динамических систем типа «вход-выход», а также основных подходов к моделированию динамики технических объектов тепло- и электроэнергетики. Дано описание математических моделей элемента теплообменного аппарата (радиационного теплообменника) и ВЭУ с горизонтальной осью вращения, которые используются в содержательных главах работы для верификации алгоритмов, а также для сопоставления точности моделей в виде полиномов Вольтерра и анализа эффективности разработанных численных методов.

Вторая глава посвящена решению задачи идентификации полиномов Вольтерра с целью построения интегральных моделей, описывающих нелинейную динамику во временной области. Предложен способ декомпозиции отклика, в основе которого лежит априорный учет необходимых условий разрешимости специальных многомерных интегральных уравнений Вольтерра I рода. Выделены классы двух- и трехмерных интегральных уравнений Вольтерра I рода, для которых сформулированы условия существования решений в требуемых классах функций. Рассмотрены специальные экстремальные задачи для выбора оптимального масштаба амплитуд тестовых сигналов применительно к имитационным моделям динамики элемента теплообменного аппарата и ВЭУ. Разработан новый подход к построению полиномов Вольтерра, основанный на идентификации интегралов от ядер. Получены сеточные аналоги полиномов Вольтерра для векторного входного сигнала, отвечающие применению метода Product Integration. Выполнен сравнительный анализ областей применимости интегральных моделей, при построении которых, во-первых, использовались методы идентификации ядер Вольтерра и интегралов от них и, во-вторых, учитывались нестационарные свойства динамической системы. Приведены результаты апробации на реальных данных, полученных в ходе физических экспериментов на ВТК ИСЭМ СО РАН.

Третья глава посвящена решению важной в теории автоматического регулирования задачи деконволюции, сформулированной в виде полиномиального уравнения Вольтерра I рода, которая состоит в определении входного воздействия динамической системы по заданным выходу, переходным характеристикам и предполагаемому уровню возмущающих воздействий. Введены и исследованы специальные классы полиномиальных уравнений Вольтерра I рода второй и третьей степени и их систем для случая векторного входного воздействия. Построены численные методы решения этих уравнений, основанные на применении кубатуры средних прямоугольников, метода интегрирования произведения, метода Ньютона–Канторовича. Разработаны алгоритмы численного решения систем квадратичных уравнений Вольтерра I рода второго порядка, основанные на редукции к уравнению четвертой степени и к системе второго порядка, содержащей линейное уравнение. Построены численные методы решения систем полиномиальных уравнений Вольтерра I рода второго порядка на основе метода Ньютона–Канторовича и квадратурных формул правых (средних) прямоугольников. Для некоторых классов полиномиальных уравнений Вольтерра I рода получены неулучшаемые оценки непрерывных решений. Выполнен сравнительный анализ алгоритмов решения полиномиальных уравнений Вольтерра I рода, использующих разные методики идентификации полиномов Вольтерра.

Четвертая глава посвящена задаче численного решения одной граничной ОЗТ на основе нового класса линейных уравнений Вольтерра I рода типа свертки. Эта задача связана с важной проблемой исследования тепловых процессов в различных научных областях (в том числе и в теплоэнергетике), когда невозможно выполнить прямые измерения требуемой физической величины и ее характеристики восстанавливаются по результатам косвенных измерений. Разработаны алгоритмы численного решения линейных уравнений Вольтерра I рода, возникающих в граничной ОЗТ, основанные на применении метода средних прямоугольников и метода Product Integration. Выявлено, что компьютерная реализация алгоритмов требует отслеживания достоверных разрядов мантиссы в процессе выполнения расчетов. Проведен сравнительный анализ с подходом, основанным на решении исходной задачи с помощью метода проекционной регуляризации.

Пятая глава посвящена описанию и применению созданного автором пакета прикладных программ «Динамика». Вычислительный комплекс разработан в объектно-ориентированной среде программирования Borland C++ Builder, основан на функционально-модульном принципе и включает универсальные модули, реализующие разработанные численные методы и алгоритмы. Тестирование проблемно-ориентированного комплекса выполнено: применительно к апробированным ранее имитационным моделям объектов тепло- и электроэнергетики; для реальных данных, полученных в ходе физического эксперимента на электрообогреваемом участке установки ВТК ИСЭМ СО РАН; для данных вычислительного эксперимента,

полученных с помощью реализованного в ИСЭМ СО РАН вычислительного комплекса «Р150» при моделировании участка энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт.

Соответствие диссертации паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Научная новизна работы, результаты, выносимые на защиту, и содержание диссертации соответствуют требованиям пунктов 1, 2, 4, 5 паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Замечания по диссертации и автореферату.

1. Не пояснено, что такое скалярный и векторный входы (входные сигналы).
2. Почему в диссертации в (2.60)–(2.63) на с. 101, а также в автореферате в уравнениях (11) и (12) нет в явном виде тестовых сигналов (воздействий) x под интегралами, а есть только ядра? Зачем несколько (четыре) уравнений?
3. Диссертация, с. 112 и автореферат, с. 22. Идентификация интегралов от ядер (а не самих ядер) использована, чтобы получить, в частности, устойчивость численного дифференцирования зашумленных данных. Желательно сравнить это с использованием сглаживающих сплайнов, также повышающих устойчивость численного дифференцирования. Далее, на рис. 2.27 (дисс., с. 119) входные сигналы с зашумлением можно сгладить сплайном. Аналогично, на рис. 3.2, 3.4, 3.5 (дисс., с. 150) имеет место дефицит точек при малых t (грубый шаг). Можно также использовать сплайны для увеличения числа точек. Это позволит более точно описать процессы вначале (при малых t).
4. Диссертация, с. 145. ИУ I рода (3.1) помимо решения $x^*(0)$ (3.3) через производную $y'(0)$ может быть решено методом квадратур с получением всего решения $x(s)$ [63, с. 122]. Это решение можно использовать в качестве хорошего начального приближения в методе Ньютона–Канторовича.
5. Диссертация, с. 146 и автореферат, с. 25. Полагается, что $x_1(t) \equiv u(t)$ – входной (искомый) сигнал, а $x_2(t) \equiv \zeta(t)$ – внешнее возмущение. В чем их сходство и различие? Если $x_2(t)$ – шум, то к $x_1(t)$ и $x_2(t)$ должны быть разные подходы. Почему в (3.9) (на с. 148) функции $x_1(s_1)$ и $x_2(s_2)$ входят в виде произведения, а не суммы? Получается, что $x_2(s_2)$ – мультипликативный (а не аддитивный) шум.

В целом, отмеченные замечания не являются принципиальными и не снижают высокую научную и практическую ценность результатов диссертации.

Заключение. Представленная диссертация содержит достоверные научные результаты и является завершенной научно-квалифицированной работой, посвященной решению крупной научной проблемы, которую можно классифицировать как создание перспективной вычислительной технологии, включающей научную концепцию, вычислительные алгоритмы и программный комплекс, для математического моделирования нелинейной динамики объектов и систем тепло- и электроэнергетики.

Работа представляет научный и практический интерес для решения обратных задач идентификации и деконволюции, возникающих при построении систем автоматического управления нелинейной динамикой, а также для совершенствования принципов управления технико-физическими показателями элементов теплообменных установок и ветроэнергетических установок с горизонтальной осью вращения. Диссертационное исследование выполнено на высоком научном и профессиональном уровне и в соответствии с паспортом специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Автореферат отражает основные положения, вынесенные на защиту.

Вывод. Считаю, что диссертационная работа «Методы построения интегральных моделей динамических систем: алгоритмы и приложения в энергетике» по своему содержанию, результатам и оформлению полностью отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Диссертация соответствует пункту 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018).

Автор диссертации, Солодуша Светлана Витальевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор факультета

Программной инженерии и компьютерной техники

Санкт-Петербургского национального исследовательского

университета информационных технологий, механики и

оптики (Университет ИТМО)

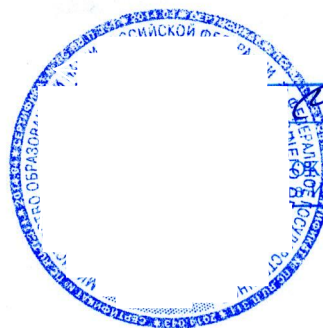
Сизиков Валерий Сергеевич

24.04.2019

Рабочий адрес: 197101, г. Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., д. 49, Университет ИТМО,
факультет ПИиКТ, профессору Сизикову В.С.

Моб. тел.: 8-964-380-44-21

e-mail: sizikov2000@mail.ru



Сизиков В.С.

Сергеев В.А.