

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора
Сизикова Валерия Сергеевича
на диссертационную работу Боевой Василисы Андреевны на тему
**«Разработка и исследование
устойчивых алгоритмов непараметрической идентификации
динамики теплоэнергетических объектов»**,
представленную к защите
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Цель диссертационной работы Боевой В.А. – разработка математических моделей (идентификации) стационарных теплоэнергетических объектов; построение и исследование устойчивых алгоритмов непараметрической идентификации динамики стационарных линейных и нелинейных теплоэнергетических объектов в условиях неполной априорной информации, способных учитывать специфические особенности практических задач.

Актуальность темы диссертации. Одним из наиболее перспективных направлений исследований в области динамики энергетических объектов является разработка математических *моделей* и эффективных численных *методов* с проверкой *адекватности* моделей, что позволяет в дальнейшем осуществлять управление функционированием энергетических систем и выбирать оптимальный режим работы систем.

Управление динамикой локально выделенных элементов энергетических систем связано с построением адекватных математических моделей и разработкой эффективных численных методов решения обратных измерительных задач, подразумевающих восстановление сигналов, характеристик процессов на основе интерпретации и обработки экспериментальных данных, получаемых в процессе измерений.

Рассматриваемые в диссертации задачи непараметрической идентификации динамики элементов теплоэнергетических систем относятся к *обратным* измерительным *задачам*. Задача непараметрической идентификации тесно связана с проектированием систем автоматического управления техническими объектами, что является одной из наиболее актуальных задач современного системного анализа. Этап идентификации переходных характеристик динамического объекта очень важен, поскольку на его основе в дальнейшем производится численное моделирование процесса управления.

Известно, что при описании математических моделей динамических объектов в форме дифференциальных уравнений невозможно учесть ряд их свойств, а для некоторых задач такие уравнения принципиально неприменимы, и в этом случае переходят к использованию моделей, использующих *интегральные уравнения*. Более универсальные интегральные модели приобретают все большую популярность для описания и изучения процессов динамических систем и объектов и успешно выступают в качестве приложений в энергетике. Математические модели теплоэнергетических объектов, рассматриваемых в диссертации, сводятся к интегральным уравнениям Вольтерра I рода, решение которых является *некорректной* (умеренно неустойчивой) *задачей*.

Для получения устойчивых решений таких уравнений требуется применение специальных методов регуляризации. Несмотря на то, что существуют традиционные подробно исследованные регуляризирующие алгоритмы (РА), они обладают известными недостат-

ками при их использовании для решения практических задач идентификации энергетических объектов. Во-первых, при задании входных и выходных сигналов идентифицируемой системы со случайной ошибкой не всегда учитывается *статистическая природа шумов* измерений, во-вторых, возникает проблема *выбора параметра регуляризации α* . Предложенные в РА способы выбора α , в частности, обобщенный принцип невязки, применимы лишь в случае наличия детерминированной априорной информации как о погрешностях исходных данных, так и о самом решении. Однако, при решении большинства прикладных задач это условие практически невыполнимо.

Применение общих подходов к решению практических задач идентификации часто не может обеспечить адекватность модели оригиналу, при этом адекватность невозможна без адаптации к особенностям прикладных задач идентификации. В связи с этим разработка новых устойчивых алгоритмов идентификации, позволяющих учитывать специфику практических задач, является весьма актуальной областью как для фундаментальных, так и для прикладных исследований.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 239 наименований, четырех приложений на 12 листах. Основной текст диссертации содержит 184 страницы, в том числе, 92 рисунка, 13 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность проводимых в работе исследований, приводится обзор источников по изучаемой тематике, формулируется цель и ставятся задачи работы, выделяется научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, излагаются основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения о публикациях в ведущих научных журналах и выступлениях на международных конференциях.

Первая глава носит обзорно-постановочный характер. Приводится характеристика предметной области исследования, описываются динамические свойства исследуемых объектов, выбираются модели для описания исследуемых теплоэнергетических объектов, конкретизируются решаемые задачи – задачи непараметрической идентификации переходных характеристик динамического объекта на основе экспериментальных исходных данных – входных и выходных сигналов. Определяются задачи разрабатываемых алгоритмов идентификации и методы, используемые для их построения.

Вторая глава посвящена разработке алгоритмов идентификации импульсных переходных функций линейных динамических объектов, модели которых строятся на основе интегральных уравнений Вольтерра I и II рода типа свертки, при ступенчатом и произвольном входных воздействиях. Показывается применение разработанных алгоритмов для интерпретации натурного эксперимента в системе обеспечения микроклимата (СОМ) «ВН-ВЕНТ-ПОМ» на основе построенных математических моделей и решение задач непараметрической идентификации переходных процессов теплообмена в этой системе.

Третья глава посвящена разработке алгоритма идентификации переходных характеристик нелинейных динамических объектов, модели которых строятся на основе квадратного полинома Вольтерра, при ступенчатом входном воздействии. Показывается применение разработанного алгоритма для решения задач непараметрической идентификации переходных характеристик теплообменника и конденсатора на участке пароводяного тракта энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт.

Четвертая глава посвящена описанию разработанных авторских пакетов прикладных программ для компьютерного моделирования динамических объектов и проведения вычислительных экспериментов.

В заключении кратко повторены основные результаты диссертационной работы.

В приложении представлены копии актов внедрения результатов диссертационного исследования, список научных проектов по теме диссертационной работы, поддержанных грантами, список конференций, на которых были представлены результаты диссертации, копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Научная новизна диссертационной работы отображается в виде следующих основных *результатов*.

1. Предложена эффективная методика устойчивого *вычисления производных* первого и второго порядка на основе аппаратов сглаживающих кубических сплайнов (СКС) и сглаживающих бикубических сплайнов (СБС). Сформирован новый тип краевых условий (КУ) сплайна – комбинированные КУ, позволяющие максимально учитывать специфические особенности обрабатываемых сигналов. Модифицированы алгоритмы оценивания оптимального *параметра сглаживания сплайна* в зависимости от наличия или отсутствия априорной информации о числовых характеристиках шумов измерений в сигналах идентифицируемой системы.

2. Введены новые понятия скалярного и векторного *параметров сглаживания* для СБС. Разработана модификация *метода L-кривой* для оценивания оптимальных значений скалярного и векторного параметров сглаживания сплайна при неизвестных числовых характеристиках шума измерений в зарегистрированном сигнале.

3. Разработаны новые *устойчивые алгоритмы непараметрической идентификации* для линейных стационарных динамических объектов при ступенчатом и произвольном входных воздействиях и для нелинейных детерминированных динамических объектов, которые учитывают специфические особенности практических задач идентификации.

4. Исследована целесообразность, предложены методы и даны рекомендации относительно проведения этапов *предобработки* исходных зашумленных данных в задаче идентификации и *постобработки* полученных решений.

5. Разработаны комплексы проблемно-ориентированных *программ* для решения практических задач идентификации переходных характеристик динамических объектов и проведения вычислительного эксперимента на основе данных натурального эксперимента и имитационного моделирования.

Теоретическая ценность результатов диссертационной работы. В работе развиваются теоретические основы *методов решения некорректных задач* непараметрической идентификации в условиях неполной априорной информации. Введены *новые типы КУ* для построения сплайнов СКС и СБС и разработаны соответствующие им алгоритмы вычисления коэффициентов сплайна. Введены новые понятия *скалярного и векторного параметров сглаживания*. На основе модифицированного метода L-кривой построен алгоритм оценивания скалярного и векторного оптимальных параметров сглаживания СБС. Разработаны новые устойчивые алгоритмы непараметрической идентификации переходных характеристик стационарных динамических объектов при различных типах входных и выходных сигналов идентифицируемого объекта.

Практическая ценность диссертационной работы. Выявлены специфические особенности и сложности возникающих на практике задач непараметрической идентификации динамики теплоэнергетических объектов. Разработаны способы учета специфики

практических задач идентификации, которые можно использовать как в комплексе, так и по отдельности для каждой конкретной задачи. Сформулированы практические рекомендации по *выбору КУ* при построении сплайна, оцениванию оптимального *параметра сглаживания* сплайна, а также методов *предобработки* зашумленных исходных данных задачи идентификации и *постобработки* найденных решений. Разработано *программное обеспечение* для реализации модифицированных методик и построенных алгоритмов идентификации.

Эффективность предложенных алгоритмов идентификации доказана при решении *практических задач*: идентификации переходных процессов теплообмена элементов системы обеспечения микроклимата (СОМ) в помещении; прогнозирования реакции теплового потока элементов СОМ на скачкообразное изменение входной мощности воздухонагревателя; идентификации динамики изменения энтальпии на выходе из теплообменника; идентификации динамики изменения давления на выходе из конденсатора на участке пароводяного тракта энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт.

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

1. 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»;

2. Пункту 4 области исследований специальности ВАК 1.2.2. «Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели»;

3. Пункту 9 области исследований специальности ВАК 1.2.2. «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки)».

В диссертации присутствуют оригинальные результаты из трех областей:

1. *Математическое моделирование.* Математические модели элементов системы обеспечения микроклимата «Воздухонагреватель-Вентилятор-Помещение» (СОМ «ВН-ВЕНТ-ПОМ»).

2. *Численные методы.* Новые устойчивые алгоритмы непараметрической идентификации для линейных стационарных динамических объектов при ступенчатом и произвольном входных воздействиях и для нелинейных детерминированных динамических объектов, которые учитывают специфические особенности практических задач идентификации. Методика устойчивого вычисления производных первого и второго порядка на основе СКС и СБС.

3. *Комплексы программ.* Комплексы проблемно-ориентированных программ для решения практических задач идентификации переходных характеристик динамических объектов с помощью предложенных алгоритмов и проведения вычислительного эксперимента на основе данных натурального эксперимента и имитационного моделирования:

- Идентификация динамики линейных объектов», реализующая Алгоритм 1 и Алгоритм 2 непараметрической идентификации переходных характеристик линейных динамических объектов.

• «Идентификация динамики нелинейных объектов», реализующая Алгоритм 3 идентификации переходных характеристик нелинейных динамических объектов.

Достоверность научных результатов исследования подтверждается соответствием разработанных теоретических положений и результатов вычислительных экспериментов, адекватностью используемых в работе математических моделей теплоэнергетических объектов, адекватностью и корректным использованием применяемого математического аппарата; продемонстрирована при решении модельных задач и при расчетах с реальными экспериментальными данными.

Обоснование научных результатов исследования требовало применения аппарата вычислительной математики, линейной алгебры, численных методов дифференцирования и решения интегральных уравнений, теории обработки экспериментальных данных. Теоретические положения получены на основании строгих математических выкладок. Устойчивость предлагаемых алгоритмов обеспечивается фильтрацией исходных зашумленных данных задачи идентификации, а также вычислением производных для экспериментальных зашумленных сигналов на основе сглаживающего сплайна с эффективным подбором параметра сглаживания.

Оценка изложения материала автореферата и диссертации. Диссертационная работа Боевой В.А. является завершенной научно-квалификационной работой. Достоверность полученных результатов подтверждается многочисленными результатами вычислительного эксперимента расчетов и решением реальных практических задач по данным натурального эксперимента. Диссертационная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для защиты и свидетельствующие о личном вкладе автора в науку. Изложение материала логичное и понятное, представленные в работе рисунки и таблицы наглядны. Для заимствований, содержащихся в тексте диссертации, приводятся ссылки на первоисточник. Автореферат полностью соответствует содержанию работы.

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

1. Нужно расшифровать понятие «непараметрическая идентификация», например, идентификация – это построение математических моделей динамических систем с акцентом на подобие оригиналу и т.д. При этом модель может использовать *параметры*, изменяя которые мы меняем модель, но модель может не использовать параметры. Нужно объяснить непараметрическую идентификацию, хотя в работе использованы скалярный и векторный параметры сглаживания сплайна.

2. Для верификации (соответствия оригиналу) разрабатываемых алгоритмов идентификации в работе используется решение соответствующих прямых задач с использованием вычисленных динамических характеристик. Однако решение *прямой задачи* не всегда может давать оценку точности найденного решения некорректных задач.

3. В работе предлагается при построении сплайна использовать *краевые условия*, задающие значения производной первого порядка или с нулевой производной второго порядка, исходя из имеющейся априорной информации о поведении функции на ее краях. Однако нет конкретных рекомендаций по заданию тех или иных краевых условий.

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 энер-

гетических объектов. Диссертация автора «Разработка и исследование устойчивых алгоритмов непараметрической идентификации динамики теплоэнергетических объектов» полностью соответствует специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решены практические задачи непараметрической идентификации переходных характеристик линейных и нелинейных стационарных динамических объектов с учетом априорной информации об исходных данных объектов.

Основное содержание и результаты диссертационного исследования опубликованы в 38 статьях, из них: 2 – в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК по научной специальности 1.2.2.; 10 – в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК по другим специальностям; 2 – в изданиях, индексируемых базами WoS/Scopus; 2 – в трудах конференций, индексируемых базами WoS/Scopus; 22 – в иных изданиях. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Считаю, что диссертационная работа Боевой Василисы Андреевны «Разработка и исследование устойчивых алгоритмов непараметрической идентификации динамики теплоэнергетических объектов» 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 Боева В.А. заслуживает присуждения ей 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.С.

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