

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

доктора физико-математических наук Баландина Александра Леонидовича  
на диссертационную работу Боевой Василисы Андреевны на тему

**«Разработка и исследование устойчивых алгоритмов  
непараметрической идентификации динамики теплоэнергетических  
объектов»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 1.2.2. Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В работе рассматриваются задачи непараметрической идентификации динамики элементов теплоэнергетических систем, которые тесно связаны с проектированием систем автоматического управления техническими объектами и численным моделированием процесса управления, что, несомненно, является актуальными задачами современного системного анализа. Решение практических задач непараметрической идентификации динамических систем и объектов требует применения специальных методов регуляризации, которые должны обеспечивать адекватность модели реальному объекту и быть адаптированными к особенностям прикладных задач идентификации. Традиционные регуляризирующие алгоритмы обладают известными недостатками, которые обуславливают их неэффективность при решении практических задач идентификации энергетических объектов. В связи с этим представленная в диссертации разработка новых устойчивых алгоритмов идентификации, позволяющих учитывать специфику практических задач, является весьма актуальной областью как для фундаментальных, так и для прикладных исследований.

### **НАУЧНАЯ НОВИЗНА**

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

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) – комбинированные КУ, позволяющие максимально учитывать специфические особенности обрабатываемых сигналов. Модифицированы и исследованы 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 и исследована 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 натурного эксперимента и имитационного моделирования.

### **СООТВЕТСТВИЕ ПАСПОРТУ СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

Диссертация соответствует Паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) по следующим пунктам:

- п. 3 Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

- п. 4 Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели.

- п. 9 Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки).

Имеются принципиально новые результаты их трех областей:

1. Математическое моделирование. Разработаны математические модели элементов системы обеспечения микроклимата «Воздухонагреватель-Вентилятор-Помещение».

2. Численные методы. Разработаны новые устойчивые алгоритмы непараметрической идентификации для линейных стационарных

динамических объектов при ступенчатом и произвольном входных воздействиях и для нелинейных детерминированных динамических объектов.

3. Комплексы программ. Разработаны 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.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ**

Теоретическая ценность диссертационной работы определяется тем, что она вносит существенный вклад в развитие теоретических основ методов решения некорректно поставленных задач непараметрической идентификации в условиях неполной априорной информации. Практическая ценность диссертационной работы связана с разработкой способов учета специфики практических задач идентификации, которые можно использовать как в комплексе, так и по отдельности для каждой конкретной задачи. С помощью разработанных автором методов и алгоритмов успешно решены практические задачи: 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. Также разработано программное обеспечение для реализации модифицированных методик и построенных алгоритмов идентификации.

### **ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫНОСИМЫХ НА ЗАЩИТУ**

Достоверность и обоснованность результатов исследования сомнений не вызывают. Достоверность численных результатов подтверждается результатами расчетов в программных комплексах, а также данными натурального эксперимента, выполненного в Оренбургском государственном университете и экспериментальными данными, полученными с цифрового двойника Назаровской ГРЭС.

Основные выводы по теме диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных конференциях всероссийского и международного уровней и семинарах по профилю работы.

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.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Диссертация написана в форме, позволяющей получить полное и достаточно подробное представление о материалах исследований, проведенных автором. Оформление работы аккуратное, соответствует требованиям ГОСТ. 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.

**В первой главе** приводится характеристика предметной области исследования, описываются динамические свойства исследуемых объектов, выбираются модели для описания исследуемых теплоэнергетических объектов, конкретизируются решаемые задачи.

**Во второй главе** разрабатываются алгоритмы 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 СОМ «ВН-ВЕНТ-ПОМ» на основе построенных математических моделей и решение задач непараметрической идентификации переходных процессов теплообмена в этой системе.

**В третьей главе** разрабатываются алгоритмы идентификации переходных характеристик нелинейных динамических объектов, модели которых строятся на основе квадратичного 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.



**В четвертой главе** приводится описание авторских пакетов прикладных программ для компьютерного моделирования динамических объектов и проведения вычислительных экспериментов.

## **ВОПРОСЫ, ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ И АВТОРЕФЕРАТУ**

Необходимо сделать следующие замечания:

1. По мнению оппонента, изложение математических вопросов и применение разработанных алгоритмов идентификации к решению практических задач целесообразно разделить.

2. В диссертационной работе предложены устойчивые алгоритмы идентификации стационарных систем для двух видов входных сигналов: ступенчатой формы и произвольной формы. В работе нет рекомендации какую форму следует выбрать для идентификации с меньшей ошибкой, если у экспериментатора есть возможность использовать либо ту, либо другую формы входного сигнала идентифицируемой системы. Такие бы рекомендации были бы весьма полезны на практике.

3. В формулах (2.14), (2.30) весовые множители стоят в степени минус единица, хотя обычно весовые множители в подобных выражениях имеют степень единицу, т.е. без минуса.

4. Отсутствует четкое изложение процедуры определения кривизны L-кривой и, как следствие, непонятен алгоритм вычисления параметра сглаживания на основе метода L-кривой.

Высказанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы в целом.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа Боевой Василисы Андреевны «Разработка и исследование устойчивых алгоритмов непараметрической идентификации динамики теплоэнергетических объектов» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной автором на высоком научном уровне. Задача актуальна, а ее решение обладает научной новизной. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Автореферат в пределах своего объема адекватно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация 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) и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу.

Считаю, что представленная научная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Боева Василиса Андреевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Официальный оппонент**

Доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
отделения Прикладных проблем  
математической физики и теории поля  
ФГБУН ИДСТУ СО РАН

Баландин Александр Леонидович

« 14 » августа 2023 г.

**Подпись заверяю**  
Нач. отдела делопроизводства  
и организационного обеспечения  
ИДСТУ СО РАН

ноненки



Полное название организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук (ИДСТУ СО РАН)

Адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134

Телефон: +7 (3952) 42-71-00, <http://idstu.irk.ru/>, e-mail: [idstu@icc.ru](mailto:idstu@icc.ru)