

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям

ФГБОУ ВО ТГУСУР

кандидат технических наук, доцент

Лоцилов Антон Геннадьевич

« 28 » августа 2019 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования

«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

на диссертационную работу Боевой Василисы Андреевны на тему

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

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

На отзыв ведущей организации предоставлены следующие материалы:

- диссертация, состоящая 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;
- автореферат диссертации объемом 27 страниц, в котором дана общая характеристика работы, приведены основные результаты и выводы.

Представленные материалы с достаточной полнотой раскрывают сущность диссертационной работы и дают возможность оценить и квалифицировать ее с точки зрения научной и практической ценности на соответствие требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

### 1. Актуальность темы исследований

В диссертации Боевой В.А. рассматривается актуальная задача – разработка математических моделей и устойчивых алгоритмов непараметрической идентификации переходных характеристик стационарных линейных и нелинейных объектов в условиях неполной априорной информации, способных учитывать специфические особенности практических задач.

Одним из наиболее перспективных направлений исследований в области динамики энергетических объектов является разработка эффективных численных методов построения

и проверки адекватности математических моделей, которые лежат в основе численного моделирования процесса управления в системах энергетики. Нижний уровень структурной схемы управления энергетической системой включает управление динамикой локально выделенных элементов. Исследование динамических характеристик элементов энергетической системы дает возможность их регулирования, поэтому особую актуальность приобретает построение адекватных математических моделей и разработка эффективных численных методов решения соответствующих обратных измерительных задач, в случае динамических объектов, подразумевающих восстановление сигналов, характеристик, процессов на основе интерпретации и обработки экспериментальных данных, поступающих в процессе измерений. В качестве исходных данных при решении обратных измерительных задач выступают экспериментально полученные характеристики, которые искажаются случайными погрешностями измерений различной статистической природы. В исходной постановке такие задачи относятся к некорректно поставленным, а их решения характеризуются, как правило, неустойчивостью к малым ошибкам задания исходных данных. К классу обратных измерительных задач относятся рассматриваемые в диссертационной работе задачи непараметрической идентификации переходных характеристик элементов теплоэнергетических систем.

В литературе отмечается, что при описании математических моделей динамических объектов в форме дифференциальных уравнений невозможно учесть ряд их свойств, а для некоторых задач такие уравнения принципиально неприменимы. Все большую популярность для описания и изучения процессов динамических систем и объектов приобретают более универсальные интегральные модели, успешно выступающие в качестве приложений в энергетике. Математические модели теплоэнергетических объектов, рассматриваемых в диссертации, сводятся к интегральным уравнениям типа Вольтерра I рода.

Для получения устойчивых решений некорректно поставленных задач идентификации требуется применение специальных методов регуляризации. Несмотря на то, что существует множество разработанных, хорошо исследованных и относительно устойчивых классических регуляризирующих алгоритмов, они обладают известными недостатками, которые не позволяют использовать их для решения практических задач идентификации энергетических объектов. Кроме того, в существующей литературе недостаточно проработаны вопросы выбора управляющего параметра регуляризирующего алгоритма. Применение общих подходов к решению практических задач идентификации часто не может обеспечить адекватность модели реальному объекту, поэтому оно невозможно без известной адаптации к особенностям прикладных задач.

## **2. Новизна исследований и полученных результатов**

По мнению ведущей организации, к числу наиболее значимых результатов, впервые полученных автором и определяющих соответствие диссертации требованиям ВАК, следует отнести следующее.

1. Предложена эффективная методика устойчивого вычисления частных и смешанных производных первого и второго порядка на основе аппаратов сглаживающего кубического и бикубического сплайнов. Сформирован новый тип краевых условий – комбинированные краевые условия, 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 сглаживающего бикубического сплайна разработана модификация метода L-кривой для оценивания оптимальных значений скалярного и векторного параметров сглаживания двумерного сплайна при неизвестных числовых характеристиках шума измерений в зарегистрированном сигнале.

3. Разработаны новые устойчивые алгоритмы непараметрической идентификации, учитывающие специфические особенности практических задач идентификации, на основе известных формул обращения интегральных уравнений вольтерровского типа.

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

### **3. Практическая значимость и реализация результатов**

Предложенные модели и методы были зарегистрированы в государственном реестре программ для ЭВМ. Результаты исследований в рамках диссертационной работы и ее материалы используются в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам: «Специальные разделы математики» при подготовке магистров по направлению 09.04.02 Информационные системы и технологии; «Обработка экспериментальных данных, планирование эксперимента, построение математической модели», «Устойчивые методы идентификации динамических объектов» при подготовке аспирантов по направлению 08.06.01 Техника и технология строительства; в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплине «Случайные процессы в системах автоматического управления» при подготовке магистров по направлению 27.04.04 Управление в технических системах.

Пакет модулей библиотечного типа «Пакет модулей фильтрации сглаживающими кубическими сплайнами для функции одной переменной» используется в отделе измерений времени и частоты Западно-Сибирского филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений» при выполнении НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ-Синхронизация» в задаче хронометрического нивелирования для обработки результатов частотно-временных измерений, имеющих высокий уровень шумов. Пакет модулей библиотечного типа «Пакет модулей фильтрации сглаживающими бикубическими сплайнами для функции двух переменных» используется в лаборатории № 3 акционерного общества «Институт прикладной физики» в рамках выполнения инициативной НИР «Снайпер-М» в прикладных научных исследованиях в части математического и программного обеспечения решения задачи устойчивого вычисления первой и второй производных по зашумленным экспериментальным данным.

### **4. Соответствие паспорту специальности**

Диссертация Боевой Василисы Андреевны соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические

науки) на соискание ученой степени кандидата технических наук по следующим пунктам.

**Пункт 4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели.** Разработаны новые устойчивые алгоритмы непараметрической идентификации переходных характеристик стационарных динамических объектов, способные учитывать специфические особенности практических задач идентификации на основе известных формул обращения интегральных уравнений вольтерровского типа.

**Пункт 9. Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки).** Способы учета специфических особенностей при статистической обработке экспериментальных данных и решении практических задач идентификации динамики теплоэнергетических объектов: вычислительный эксперимент и статистический анализ точности оценивания оптимальных скалярного и векторного параметров сглаживания сплайна на основе модифицированного метода L-кривой; вычислительный эксперимент по исследованию эффективности рассматриваемых алгоритмов предобработки зашумленных данных задачи идентификации и постобработки найденных решений.

**Пункт 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.** Реализация вычислительных методов и алгоритмов идентификации в виде проблемно-ориентированных программных комплексов, включающих пакеты модулей библиотечного типа и прикладные программно-вычислительные комплексы для решения практических задач идентификации, позволяющие проведение активного вычислительного эксперимента с использованием данных натурального эксперимента и имитационного моделирования.\

#### **5. Обоснованность и достоверность результатов научных исследований**

Выводы и результаты диссертации представляются достоверными, обоснованными и апробированными. Это подтверждается тем, что:

- в основе построения авторских алгоритмов лежит строго обоснованная теория классических интегральных уравнений Вольтерра I рода типа свертки, для которых существуют доказанные конструктивные теоремы существования решения и приближенные методы решения;
- строго сформулирована и обоснована математическая постановка задачи;
- разработанные теоретические положения и результаты вычислительных экспериментов соответствуют друг другу;
- теоретически и эмпирически обоснована устойчивость предлагаемых численных методов вычисления производных по зашумленным данным;
- достоверность результатов и выводов подкрепляется расчетами на модельных примерах и на экспериментальных данных;
- разработанные алгоритмы прошли апробацию путем обработки как модельных, так и экспериментальных данных, полученных на основе натурной и имитационных моделей объектов теплоэнергетических систем.

#### **6. Апробация и публикации результатов диссертационной работы**

Результаты диссертационного исследования и материалы работы докладывались на конференциях всероссийского и международного уровня и получили положительные

отзывы, а также на научных семинарах.

Основное содержание и результаты диссертационного исследования опубликованы в 38 публикациях, 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.

#### **7. Анализ содержания диссертации**

**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.

**Первая глава** носит обзорно-постановочный характер. Приводится характеристика предметной области, описываются динамические свойства исследуемых объектов, конкретизируются используемые в работе математические модели и решаемые задачи идентификации. Приводится описание модели системы обеспечения микроклимата «Воздухонагреватель-Вентилятор-Помещение» и имитационных моделей нелинейных динамических элементов теплообменных систем: модели теплообменника, модели конденсатора на участке пароводяного тракта энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт. Рассматриваются параметры объектов и характеристики, определяемые в качестве исходных данных при решении задач идентификации. На основе априорной информации об объектах и их поведении строятся математические модели исследуемых объектов. Приводится описание интегральных моделей исследуемых динамических объектов, выполняется постановка задач идентификации, рассматриваются трудности и специфика решения таких задач. Вводятся модели шумов измерений, которые будут использоваться в работе. Кратко обсуждаются новые и модифицированные эффективные численные методы, алгоритмы и понятия, предлагаемые для решения поставленных задач.

**Во второй главе** приводится постановка задач непараметрической идентификации переходных процессов теплообмена в теплоэнергетической системе «Воздухонагреватель-Вентилятор-Помещение» при скачкообразном изменении тепловой мощности воздухонагревателя. Рассматривается эффективность алгоритмов фильтрации при различных моделях шумов измерений в исходном сигнале. Излагается методика построения сглаживающего кубического сплайна для нового типа комбинированных краевых условий, которые задаются исходя из специфики решаемой задачи. Приводятся матрицы коэффициентов сплайна с комбинированными краевыми условиями. Представлены модификации статистического критерия оптимальности и метода L-кривой для оценивания оптимального параметра сглаживания сплайна при заданной и неизвестной дисперсии шума измерений в исходном сигнале. Приводится статистический анализ результатов численных экспериментов по устойчивому дифференцированию зашумленных данных сглаживающим кубическим сплайном. Рассматривается построение устойчивых алгоритмов непараметрической идентификации импульсных переходных функций линейных динамических объектов. Предложены два алгоритма: Алгоритм-1 на основе интегрального уравнения Вольтерра I рода при ступенчатом входном воздействии и Алгоритм-2 на основе интегрального уравнения Вольтерра II рода при произвольном входном воздействии. Показано применение разработанных алгоритмов для решения практических задач

идентификации переходных процессов теплообмена элементов системы обеспечения микроклимата «Воздухонагреватель-Вентилятор-Помещение» и для проверки адекватности математических моделей исследуемых объектов на основе данных натурального эксперимента.

**В третьей главе** приводятся постановки задач непараметрической идентификации переходных характеристик теплообменника и конденсатора на участке пароводяного тракта энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт соответственно. Представлены математические модели исследуемых объектов в терминах «вход-выход». Определяются характеристики, принимаемые в качестве входных и выходных сигналов объектов, и способы их представления. Излагается методика построения сглаживающего бикубического сплайна для вычисления устойчивых частных и смешанных производных второго порядка зашумленного сигнала с выбором параметров сглаживания и различными комбинациями краевых условий, задаваемых исходя из специфики решаемой задачи. Вводятся понятия скалярного и векторного параметров сглаживания и исследуется их эффективность при построении бикубического сплайна на основе статистического анализа результатов численных экспериментов. Предлагаются модификации методик оценивания оптимальных значений скалярного и векторного параметров сглаживания при известных и неизвестных характеристиках шума измерений. Рассматривается построение устойчивого Алгоритма-3 непараметрической идентификации ядра  $K_2$  квадратичного члена полинома Вольтерра в моделях нелинейных динамических объектов. Показано применение разработанного Алгоритма-3 для решения практической задачи идентификации переходной характеристики теплообменника. Проводится верификация интегральной модели, используемой для описания исследуемого объекта, на тестовых сигналах из семейств, используемых для идентификации. Рассматривается влияние шума измерений в исходных данных задачи на точность идентификации. Показано применение разработанного Алгоритма-3 для решения практической задачи идентификации переходной характеристики конденсатора на участке пароводяного тракта энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт. Выполняется проверка адекватности математических моделей исследуемых объектов на основе их имитационных моделей.

**Четвертая глава** содержит краткую характеристику разработанного программного обеспечения: пакетов модулей библиотечного типа, тестовых программ и прикладных программно-вычислительных комплексов для решения задач идентификации. Обозначаются цели и назначение пакетов прикладных программ, кратко обсуждается состав компонентов разработанного программного обеспечения и их функциональные возможности. Рассматриваются пакеты модулей библиотечного типа, которые реализуют основные вычислительные методы, используемые для построения алгоритмов идентификации. Рассматривается программно-вычислительный комплекс для решения практических задач идентификации линейных динамических объектов, реализующий работу Алгоритмов-1, -2. Обсуждается применение программно-вычислительного комплекса для решения задач идентификации и моделирования переходных процессов теплообмена элементов системы обеспечения микроклимата. Рассматривается программно-вычислительный комплекс для решения практических задач идентификации нелинейных динамических объектов, реализующий работу Алгоритма-3. Обсуждается применение программно-вычислительного комплекса для решения задач идентификации и моделирования динамики элементов теплообменных систем. Представленные в главах 1-3 диссертационной работы результаты получены с помощью разработанного программного

обеспечения.

В заключении приводятся выводы, которые соответствуют поставленным задачам исследования и позволяют прийти к достижению цели.

**8. На обсуждение предлагается вынести следующие вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы**

1. Не приведены алгоритмы программ, составленные в соответствии с ГОСТ 19.701-90 «Схемы алгоритмов, программ, данных и систем».
2. Пункт 5 «Разработка комплексов проблемно-ориентированных программ» не является научной новизной»
3. Нет сравнения с результатами других авторов (аналогов)
4. В тексте диссертации отмечается очень большой объем описаний исследуемых технических объектов, который слабо используется в дальнейшем при построении математической модели исследуемых систем.
5. Предложенный в диссертационной работе устойчивый алгоритм идентификации стационарной системы при произвольном входном сигнале дает экспериментатору широкие возможности выбора при генерации входного сигнала идентифицируемой системы. Однако в таком случае хотелось бы иметь некоторые рекомендации (подкрепленные результатами вычислительного эксперимента) по определению хотя бы вида или класса входных воздействий для минимизации ошибки идентификации, что было бы весьма полезным для решения практических задач идентификации.
6. Замечания редакционного характера: таблицы диссертации 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 содержат слишком много данных и затруднительны для анализа.

Представленные замечания не изменяют общего положительного впечатления о работе и ее практическую значимость.

**9. Заключение**

Диссертационная работа Боевой Василисы Андреевны на тему «Разработка и исследование устойчивых алгоритмов непараметрической идентификации динамики теплоэнергетических объектов» по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) представляет собой самостоятельно выполненную автором научно-квалификационную работу, в которой решены практические задачи непараметрической идентификации переходных характеристик линейных и нелинейных стационарных динамических объектов с учетом априорной информации об исходных данных объектов.

Диссертация является завершенной научной работой. Все разделы диссертации взаимосвязаны и отвечают поставленной цели. Диссертацию характеризует внутреннее единство по существу представленного материала, хороший уровень изложения и качество оформления. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы и полностью отражает основные научные и практические результаты диссертационного исследования. Опубликованные работы, автореферат, а также выступления автора на научных конференциях и семинарах достаточно полно отражают содержание диссертационной работы, ее основные положения и выводы.

Диссертационная работа полностью отвечает всем требованиям и критериям п. 9-14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым ВАК Минобрнауки России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а также требованиям ГОСТ Р

7.0.11 - 2011.

Личный вклад соискателя не вызывает сомнений и состоит в формировании цели и задач исследования, разработке экспериментальных теоретических методов их решения, в обработке, анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов.

Автор диссертации Боева Василиса Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Отзыв на диссертацию Боевой В.А. «Разработка и исследование устойчивых алгоритмов непараметрической идентификации динамики теплоэнергетических объектов» составлен на основании заключения кафедры автоматизированных систем управления Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по результатам рассмотрения и обсуждения диссертации на научном семинаре кафедры автоматизированных систем управления « 28 » августа 2023 г., протокол №9.

Заведующий кафедрой автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО ТУСУР, кандидат технических наук, доцент

« 28 » августа 2023 г.

Романенко Владимир Васильевич

Профессор кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО ТУСУР, доктор технических наук, профессор

« 28 » августа 2023 г.

Мицель Артур Александрович

#### Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Почтовый адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 40

Тел.: +7 (3822) 51-05-30, e-mail: [office@tusur.ru](mailto:office@tusur.ru), <https://tusur.ru/ru>

Я, Романенко Владимир Васильевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Боевой Василисы Андреевны, и их дальнейшую обработку.

Я, Мицель Артур Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Боевой Василисы Андреевны, и их дальнейшую обработку.

П.

У.