

На правах рукописи



Боева Василиса Андреевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
УСТОЙЧИВЫХ АЛГОРИТМОВ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ДИНАМИКИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» («НГАСУ (Сибстрин)»)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Воскобойников Юрий Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Сизиков Валерий Сергеевич**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет программной инженерии и компьютерной техники, профессор
Баландин Александр Леонидович
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, отделение Прикладных проблем математической физики и теории поля, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

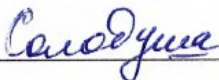
Защита состоится «19» сентября 2023 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.118.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, каб. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, каб. 407, и на сайте: <https://isem.irk.ru/dissert2/case/DIS-2023-3/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.1.118.01,
доктор технических наук, доцент



Солодуша
Светлана Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Перспективным направлением исследований в области динамики энергетических объектов является разработка эффективных численных методов построения и проверки адекватности их математических моделей, что позволяет в дальнейшем осуществлять управление функционированием и оптимизацию режимов энергетических систем. Существенный вклад в эти исследования внесли ведущие учёные Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН Л.А. Мелентьев, Ю.Н. Руденко, Н.И. Воропай, В.А. Стенников, Д.В. Соколов, В.Г. Курбацкий, Н.Н. Новицкий, Л.В. Массель.

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, поступающих в процессе измерений. Основы теории и методов решения обратных и некорректных задач заложили А.Н. Тихонов, М.М. Лаврентьев и В.К. Иванов и продолжили в своих трудах В.В. Васин, А.С. Леонов, А.В. Гончарский, А.Г. Ягола, С.И. Кабанихин, В.Г. Романов, Ю.Е. Аниконов, А.М. Денисов, Н.W. Engl, P.C. Hansen, F.D.M. Neto.

К классу обратных измерительных задач относятся рассматриваемые в диссертационной работе задачи непараметрической идентификации динамики элементов теплоэнергетических систем. основополагающие работы по теории и методам идентификации представлены в классических трудах А.М. Дейча, Л. Льюнга, П. Эйкхоффа, Н.С. Райбмана, Я.З. Цыпкина и продолжаются в исследованиях Ю.Е. Воскобойникова, Ю.С. Попкова, Н.Н. Бахтадзе, W. Greblicki. Методы математического моделирования и идентификации математических моделей теплообменных систем исследуются в работах А.А. Самарского, О.М. Алифанова, Ю.Я. Кувшинова, Р.Ш. Мансурова. Среди современных работ исследования по численному моделированию, оптимизации и идентификации параметров сложных теплоэнергетических систем также представлены в трудах учёных ИСЭМ СО РАН Э.А. Таирова, А.М. Клера, И.Г. Донского, В.Э. Алексеюка.

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 интегральных моделей. Обширные исследования интегральных динамических моделей и их приложение представлены в работах В.С. Сизикова. Применение аппарата интегральных уравнений вольтерровского типа при построении моделей электроэнергетических систем

(ЭЭС) и их элементов впервые рассматривается в работах А.С. Апарцина и А.М. Тришечкина и продолжается в работах С.В. Солодуши, Д.Н. Сидорова. Математические модели теплоэнергетических объектов, рассматриваемых в диссертации, представляются в виде интегральных уравнений типа Вольтерра I рода, решение которых является некорректно поставленной задачей.

Для получения устойчивых решений таких уравнений требуется применение специальных методов регуляризации. Теория регуляризации решения интегральных уравнений I рода получила существенное развитие в трудах В.Я. Арсенина, А.Л. Агеева, В.П. Тананы, А.С. Апарцина, А.Б. Бакушинского, В.А. Морозова, Г.В. Хромовой. Несмотря на то, что существуют традиционные хорошо исследованные регуляризирующие алгоритмы, они обладают известными недостатками, которые не позволяют использовать их для решения практических задач идентификации энергетических объектов. Во-первых, при измерении входных и выходных сигналов идентифицируемой системы со случайной ошибкой не учитывается статистическая природа шумов измерений, во-вторых, возникает проблема выбора параметра регуляризации при неизвестных статистических характеристиках шума измерений, в-третьих, не учитывается тот фактор, что входной сигнал идентифицируемой системы также измеряется со случайной ошибкой. 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 идентификации.

Цель диссертационной работы.

Разработка математических моделей рассматриваемых в работе 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.

Задачи диссертационной работы.

1. Построение математических моделей элементов климатической системы, конвективного теплообменника и конденсатора на участке пароводяного тракта энергоблока электростанции на основе интегральных уравнений вольтерровского типа.

2. Построение аппарата сглаживающего кубического и бикубического сплайнов (СКС и СБС) при соответствующих краевых условиях (КУ) с эффективным выбором параметра сглаживания для устойчивого вычисления производных первого и второго порядка от зашумлённых входного и выходного сигналов идентифицируемых объектов.

3. Разработка устойчивых алгоритмов непараметрической идентификации для линейных стационарных динамических объектов при двух типах входных воздействий: ступенчатым и произвольной формы.

4. Разработка устойчивого алгоритма непараметрической идентификации для нелинейных детерминированных динамических объектов.

5. Математическое моделирование, проверка адекватности построенных математических моделей и апробация разработанных алгоритмов идентификации при решении практических задач по данным натурального эксперимента и имитационного моделирования.

6. Реализация разработанных эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для моделирования и численного исследования процесса идентификации теплоэнергетических объектов при проведении вычислительного эксперимента.

Объект исследования: линейная система обеспечения микроклимата «Воздухонагреватель-Вентилятор-Помещение» и нелинейные элементы теплоэнергетических систем на примерах теплообменника и конденсатора энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт в условиях неполной априорной информации.

Предметами исследования являются математические модели, вычислительные алгоритмы и программные средства идентификации и моделирования динамики стационарных объектов на основе интегральных моделей вольтерровского типа.

Методология и методы исследования: аппарат вычислительной математики и линейной алгебры; теория и методы решения некорректно поставленных задач и идентификации динамических систем; методы математического моделирования; методы обработки экспериментальных данных; элементы теории интегральных уравнений; элементы теории регуляризации.

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 расчётах 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 зашумлённых

данных задачи идентификации, а также вычислением производных от экспериментальных зашумлённых сигналов на основе сглаживающего сплайна с эффективным подбором параметра сглаживания.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Предложена эффективная методика устойчивого вычисления производных первого и второго порядка на основе аппаратов СКС и СБС. Сформирован новый тип КУ – 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 зашумлённых 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.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Новые устойчивые алгоритмы непараметрической идентификации: Алгоритм-1 для линейных стационарных динамических объектов при ступенчатом входном воздействии, Алгоритм-2 для линейных стационарных динамических объектов при произвольном входном воздействии, Алгоритм-3 для нелинейных детерминированных динамических объектов, способные учитывать специфические особенности практических задач идентификации.

2. Способы учёта специфических особенностей при обработке экспериментальных данных и решении практических задач идентификации динамики теплоэнергетических объектов: задание комбинированных КУ при построении сглаживающего сплайна; оценивание скалярного и векторного оптимальных параметров сглаживания сплайна на основе

модифицированного метода L-кривой; предобработка зашумлённых данных задачи идентификации и постобработка найденных решений.

3. Реализация вычислительных методов и алгоритмов идентификации в виде проблемно-ориентированных программных комплексов, включающих пакеты модулей библиотечного типа и прикладные программно-вычислительные комплексы (ПВК) для решения практических задач идентификации и проведения вычислительного эксперимента на основе данных натурального эксперимента и имитационного моделирования.

4. Результаты математического моделирования и проверки адекватности выбранных математических моделей теплоэнергетических объектов. Апробация разработанных алгоритмов идентификации при решении практических задач идентификации динамики теплоэнергетических объектов на основе данных натурального эксперимента и имитационного моделирования.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной 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 (положение 3, выносимое на защиту).

П. 4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели (положения 1, 4, выносимые на защиту).

П. 9. Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки) (положения 1, 2, 4, выносимые на защиту).

В диссертации присутствуют оригинальные результаты из трёх областей:

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

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 натурного эксперимента и имитационного моделирования.

Теоретическая ценность диссертационной работы. В работе развиваются теоретические основы методов решения некорректно поставленных задач непараметрической идентификации в условиях неполной априорной информации. Введены новые типы КУ для построения СКС и СБС и соответствующие им матрицы 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. Разработаны способы учёта 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, проведению предобработки зашумлённых исходных данных задачи идентификации и постобработки найденных решений. Всё это повышает точность решения практических задач непараметрической идентификации, что, в свою очередь, приводит к повышению эффективности моделирования в различных режимах работы теплоэнергетических объектов.

Разработано программное обеспечение для реализации модифицированных методик и построенных алгоритмов идентификации. Эффективность работы предложенных алгоритмов идентификации доказана при решении практических задач непараметрической идентификации динамики рассматриваемых в работе теплоэнергетических объектов.

Реализация диссертационной работы. Результаты исследований в рамках диссертационной работы и её материалы были использованы:

- в отделе измерений времени и частоты Западно-Сибирского филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений» («ВНИИФТРИ») при выполнении НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ-Синхронизация»,

- в лаборатории № 3 акционерного общества «Институт прикладной физики» («ИПФ») в рамках выполнения инициативной НИР «Снайпер-М»,

- в учебном процессе ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» («НГАСУ (Сибстрин)»),

• в учебном процессе ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» («НГТУ»),
что подтверждается актами о внедрении.

Основные результаты диссертационной работы получены при поддержке гранта РФФИ № 20-38-90041. Построение алгоритма идентификации динамики нелинейных объектов с помощью СБС выполнено при проведении совместных научных исследований с ИСЭМ СО РАН в рамках проекта РНФ № 22-21-00409. Практические результаты работы использованы при выполнении совместных научных исследований с кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции «НГАСУ (Сибстрин)» в рамках выполнения тематических планов и внутреннего гранта.

Апробация диссертационной работы. Результаты диссертационного исследования и материалы работы: представлялись на научных семинарах кафедры прикладной математики «НГАСУ (Сибстрин)» (руководитель семинара – д.ф.-м.н., проф. Ю.Е. Воскобойников), кафедры теплогазоснабжения и вентиляции (руководитель семинара – к.т.н., доц. Р.Ш. Мансуров) «НГАСУ (Сибстрин)»; на научно-техническом семинаре «ВНИИФТРИ» (руководитель семинара – д.т.н., проф. А.С. Толстикова); докладывались на конференциях всероссийского уровня: «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (г. Новосибирск, 2017-2019 гг.), «Наука. Технологии. Инновации.» (г. Новосибирск, 2019-2021 гг.), «Моделирование, планирование и статистический анализ экспериментов для сложных многофакторных объектов» памяти В.И. Денисова (г. Новосибирск, 2020 г.); международного уровня: «Наука молодых – будущее России» (г. Курск, 2019-2021 гг.), «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (г. Новосибирск, 2020-2022 гг.), «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (г. Новосибирск, 2020 г.), «The new science: theoretical and practical view» (г. София, Болгария, 2020 г.), «Современные материалы, техника и технология» (г. Курск, 2020-2021 гг.), «Научная сессия ТУСУР» (г. Томск, 2021 г.), «Неустойчивые задачи вычислительной математики – 2022» (г. Иркутск, 2022 г.).

Личный вклад соискателя. Текст диссертации не содержит заимствований без ссылки на соответствующий первоисточник. В исследованиях, проводимых в соавторстве с Ю.Е. Воскобойниковым, соискателю принадлежит участие в постановке задач, описании математических моделей, разработке эффективных численных методов и алгоритмов и их программной реализации, проведении вычислительных экспериментов, проверке адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента и имитационного моделирования, обработке и интерпретации результатов вычислительных экспериментов и натуральных исследований, описании теоретической и экспериментальной частей исследования.

В исследованиях, проводимых в соавторстве с Р.Ш. Мансуровым, соискателем выполнено построение математических моделей элементов климатической системы «Воздухонагреватель-Вентилятор-Помещение», программная реализация численных методов и алгоритмов идентификации динамических характеристик системы и сглаживания экспериментальных данных, проведение и описание результатов вычислительных экспериментов по идентификации и сглаживанию данных в системе, проверка адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента. В совместной публикации с Ю.Е. Воскобойниковым, С.В. Солодушей, Е.В. Марковой и Е.Д. Антипиной соискателем выполнено проведение и описание результатов вычислительных экспериментов по идентификации квадратичного ядра с помощью СКС при точно заданных и зашумлённых исходных данных. Программная реализация ПВК «Идентификация динамики линейных объектов», «Идентификация динамики нелинейных объектов» и прикладного пакета «Идентификация переходных процессов теплообмена в системе обеспечения микроклимата» выполнена соискателем лично.

Публикации по теме диссертационного исследования. 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.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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.

В п. 1.1 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.

В п. 1.2 приводится описание натурной модели линейной СОМ «ВН-ВЕНТ-ПОМ»¹. Участок, представленный воздухонагревателем (ВН) и вентилятором (ВЕНТ), называется установкой (УСТ) и является подсистемой терморегулирования в некотором обслуживаемом контролируемом помещении (ПОМ). На Рисунке 1 показана схема движения потока теплоты, выделяемой или поглощаемой влажным воздухом при прохождении через элементы исследуемой системы.

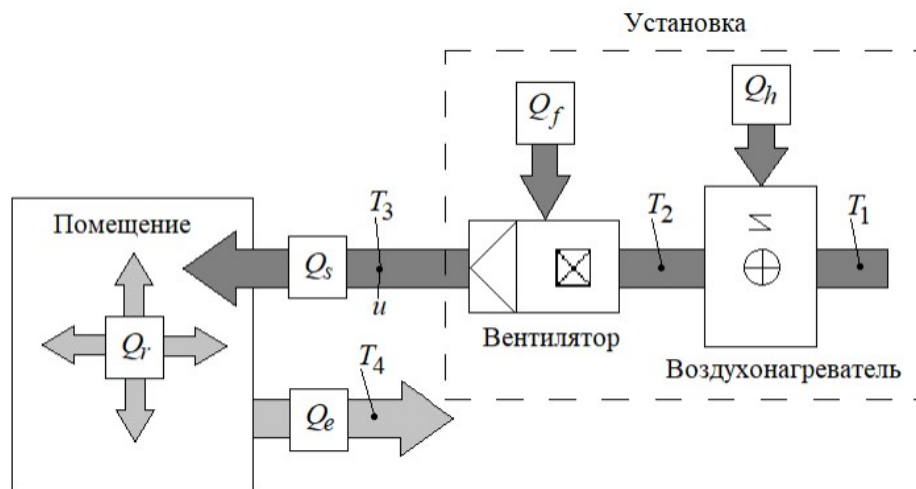


Рисунок 1 – Схема движения потоков теплоты в СОМ «ВН-ВЕНТ-ПОМ»

В качестве параметра подобия, описывающего переходные процессы теплообмена в СОМ «ВН-ВЕНТ-ПОМ», принимается относительная избыточная теплота²: $Q_h^r(t)$, выделяемая или поглощаемая потоком при прохождении через ВН; $Q_f^r(t)$, выделяемая или поглощаемая потоком при прохождении через ВЕНТ; $Q_r^r(t)$, ассимилируемая потоком при прохождении через ПОМ; $Q_s^r(t)$, выделяемая или поглощаемая потоком при прохождении через УСТ. Переходные процессы теплообмена в СОМ инициируются скачкообразным изменением тепловой мощности ВН N на 0,1 (от 0 до 0,1 – от 0,01 кВт до 1,2 кВт) в долях от максимальной

¹ СОМ «ВН-ВЕНТ-ПОМ» реализована в виде экспериментальной лабораторной установки на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции Оренбургского государственного университета под руководством к.т.н., доц., зав. кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции «НГАСУ (Сибстрин)» Р.Ш. Мансурова.

² Мансуров, Р.Ш. Интеллектуальная система управления процессами формирования микроклимата помещений / Р.Ш. Мансуров, Ю.Я. Кувшинов // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная физ. (АВОК). – 2011. – № 8. – С. 58.

мощности 10,8 кВт, при фиксированной производительности ВЕНТ $V = 0,4$ (28 Гц) в долях от максимальной частоты электрического тока 70 Гц в режиме разогрева теплового потока.

Функциональные связи между входными и выходными характеристиками исследуемых линейных элементов СОМ описываются с помощью интегральных моделей типа Вольтерра I рода. Модели рассматриваемых объектов представлены в терминах «вход-выход» и изображены на Рисунках 2-4.

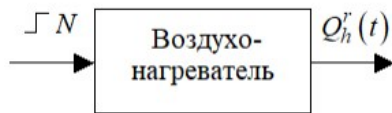


Рисунок 2 – Модель ВН



Рисунок 3 – Модель ВЕНТ

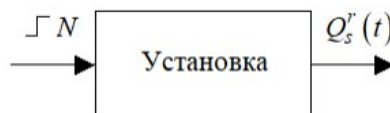


Рисунок 4 – Модель УСТ

В п. 1.3 приводится описание имитационных моделей нелинейных элементов теплообменных систем. Представлена имитационная модель конвективного теплообменника³, для которого в данной работе рассматривается изменение энтальпии $\Delta i(t)$ (кДж/кг) на выходе при произвольном изменении расхода вещества $\Delta D(t)$ (кг/с) на входе, предполагая, что остальные компоненты входных возмущений (изменение полной тепловой нагрузки $\Delta Q(t)$, изменение давления $\Delta p(t)$, изменение энтальпии на входе $\Delta i_{in}(t)$) равны нулю. В качестве входного сигнала принимается отклонение расхода вещества $\Delta D(t)$ на входе теплообменника от установившегося значения $D_0 = 0,16$ кг/с на $\pm A = \pm 25\%$. При этом начальные значения для расчётов⁴ принимаются $Q_0 = 100$ кВт, $i_{in_0} = 434$ кДж/кг, $i_0 = 1059$ кДж/кг.

Имитационная модель энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт реализована В.Ф. Чистяковым и А.А. Логиновым в ПВК «Р150», программный код ПВК «Р150» реализован в ИСЭМ СО РАН под руководством Э.А. Таирова. Исследуемый локальный участок

³ Таиров, Э.А. Интегральная модель нелинейной динамики парогенерирующего канала на основе аналитических решений / Э.А. Таиров, В.В. Запов // Вопр. атомн. науки и техн. Сер. Физ. ядерных реакторов. – 1991. – Вып. 3. – С. 14-20.

⁴ Начальные значения для расчётов предоставлены д.т.н., доц., г.н.с. отдела тепловых систем ИСЭМ СО РАН Э.А. Таировым.

пароводяного тракта энергоблока включает в себя конденсатор типа 80-КЦС-1. В работе рассматривается изменение давления $\Delta p(t)$ (Па) на выходе из конденсатора при изменении расхода воды $\Delta D(t)$ (кг/с) на входе, предполагая, что остальные компоненты входных возмущений (изменение расхода пара $\Delta D_s(t)$, изменение температуры воды на входе Δt_{in}) равны нулю. В качестве входного сигнала принимается отклонение расхода воды $\Delta D(t)$ на входе конденсатора от установившегося значения $D_0 = 11562,2$ кг/с на $\pm A = \pm 30\%$. При этом начальные значения для расчётов⁵ принимаются $D_{s_0} = 51,46$ кг/с, $t_{in_0} = 15,20$ °С, $p_0 = 4059$ Па.

Аналитические модели нелинейных теплоэнергетических объектов строятся на основе квадратичного полинома Вольтерра. Модели рассматриваемых объектов представлены в терминах «вход-выход» и изображены на Рисунках 5, 6. Рассматриваемые натурная и имитационные модели принимаются в качестве эталонных и используются для верификации и анализа эффективности разрабатываемых алгоритмов идентификации.



Рисунок 5 – Модель теплообменника

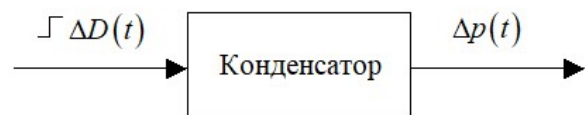


Рисунок 6 – Модель конденсатора

В п. 1.4 приводится описание интегральных моделей исследуемых динамических объектов, выполняется постановка задач идентификации в общем виде. Модель линейного динамического объекта описывается классическим уравнением Вольтерра I рода типа свёртки в традиционной для задачи идентификации форме

$$\int_0^t x(t-s) \cdot K(s) ds = f(t), \quad t \in [0, T]. \quad (1)$$

Задача непараметрической идентификации переходной характеристики для модели (1) заключается в построении оценки $\hat{K}(t)$ для импульсной переходной функции (ИПФ) $K(t)$ по зарегистрированным значениям входного сигнала (зашумлённого произвольной формы $\tilde{x}(t)$ или скачкообразного $x(t)$) и зашумлённого выходного сигнала $\tilde{f}(t)$. Следуя определениям математической статистики, здесь и далее в работе под оценкой понимается значение

⁵ Данные для расчётов предоставлены инженером ИСЭМ СО РАН Е.Д. Антипиной.

некоторой характеристики, вычисленной (численно или аналитически) по выборке экспериментальных данных конечного объёма.

Модели нелинейных объектов строятся на основе квадратичного полинома Вольтерра⁶

$$\int_0^t K_1(s) \cdot x(t-s) ds + \int_0^t \int_0^t K_2(s_1, s_2) \cdot x(t-s_1) \cdot x(t-s_2) ds_1 ds_2 = y(t), t \in [0, T]. \quad (2)$$

При этом идентификация квадратичного ядра $K_2(s_1, s_2)$ в уравнении (2) производится с помощью скалярных входных сигналов в виде линейной комбинации функций типа Хевисайда

$$x(t) = A \cdot e(t), e(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \text{ некоторой амплитуды (высоты) } A^7$$

$$\begin{aligned} x_{\omega}^A(t) &= A \cdot [e(t) - e(t - \omega)], \\ x_{\omega}^{-A}(t) &= -A \cdot [e(t) - e(t - \omega)], t, \omega \in \Delta_2, \Delta_2 = \{t, \omega : 0 \leq \omega \leq t \leq T\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Задача непараметрической идентификации динамики нелинейного объекта для модели (2) заключается в построении оценки $\hat{K}_2(s_1, s_2)$ квадратичного ядра $K_2(s_1, s_2)$, $0 \leq s_1, s_2 \leq t \leq T$ по зарегистрированным зашумлённым значениям двумерного выходного сигнала $\tilde{f}_2(t, \omega)$, $t, \omega \in \Delta_2$ при ступенчатом входном воздействии вида (3).

Вводятся модели и характеристики шумов измерений, искажающих точные значения исходных данных практических задач идентификации. Приводится обоснование выбора используемых в работе методов глобальной сплайн-аппроксимации, вейвлет-фильтрации и локально-пространственной фильтрации (ЛПФ). 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 свёртки, при ступенчатом и произвольном входных воздействиях. Показывается применение разработанных алгоритмов для интерпретации натурального эксперимента в СОМ «ВН-ВЕНТ-ПОМ» на основе построенных математических моделей и решение задач непараметрической идентификации переходных процессов теплообмена в этой системе.

⁶ Вольтерра, В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений / В. Вольтерра. – М. : Наука, 1982. – 302 с.

⁷ Apartsyn, A.S. Mathematical modelling of the dynamic systems and objects with the help of the Volterra integral series / A.S. Apartsyn // EPRI-SEI Joint Seminar. – 1991. – P. 117-132.

В п. 2.1 приводится постановка задач непараметрической идентификации переходных процессов теплообмена СОМ «ВН-ВЕНТ-ПОМ», которые заключаются в построении оценок $\hat{K}_1(t)$, $\hat{K}_2(t)$, $\hat{K}_3(t)$ по значениям соответствующих ступенчатых входных сигналов $x_1(t) = \text{const}$, $x_3(t) = \text{const}$ или зашумлённого произвольного входного сигнала $\tilde{x}_2(t)$ и зашумлённых выходных сигналов, построенных на основе данных натурального эксперимента: $\tilde{f}_1(t) = Q_h^r(t)$, $\tilde{f}_2(t) = Q_f^r(t)$, $\tilde{f}_3(t) = Q_s^r(t)$. На Рисунке 7 представлена схема процесса идентификации для подсистемы терморегулирования и её объектов для данного режима работы СОМ. При этом процессы, протекающие в контролируемой подсистеме ПОМ, непредсказуемы и носят стохастический характер, поэтому идентификация ПОМ не рассматривается.

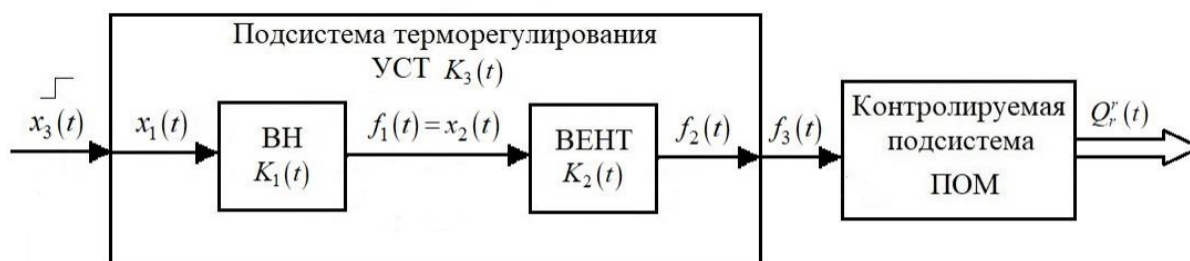


Рисунок 7 – Схема идентификации переходных процессов в СОМ «ВН-ВЕНТ-ПОМ»

В п. 2.2 рассматривается работа алгоритмов пороговой вейвлет-фильтрации и пространственного комбинированного фильтра (КФ), предлагаемых для предобработки исходных зашумлённых данных и постобработки найденных решений в задачах идентификации. Рассматривается эффективность алгоритмов фильтрации при различных моделях шумов измерений в исходном сигнале. Пороговый алгоритм вейвлет-фильтрации используется на этапе предобработки для фильтрации однородных шумов, КФ – на этапе предобработки для фильтрации однородных и импульсных шумов и на этапе постобработки.

В п. 2.3 излагается методика построения СКС для нового типа комбинированных КУ. Показано, что задание естественных КУ может привести к существенным значениям ошибок идентификации, обусловленных ошибками дифференцирования СКС в области малых и больших значений аргумента СКС. Подобный негативный эффект предлагается минимизировать, задавая **комбинированные КУ** исходя из специфики решаемой задачи:

- слева – значение первой производной, справа – нулевая вторая производная:

$$s_1 = S_f'(t_1) = f'(t_1), s_N = S_f''(t_N) = 0; \quad (4)$$

- слева – нулевая вторая производная, справа – значение первой производной:

$$s_1 = S_f''(t_1) = 0, s_N = S_f'(t_N) = f'(t_N). \quad (5)$$

Приводятся матрицы коэффициентов сплайна с комбинированными КУ. 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 зашумлённых данных с помощью СКС.

В п. 2.4 рассматривается построение устойчивого **Алгоритма-1 идентификации ИПФ линейного объекта при ступенчатом входном воздействии.**

Этап 1 (опциональный). Предварительная обработка зашумлённого сигнала $\tilde{f}(t)$ алгоритмом пороговой вейвлет-фильтрации или КФ.

Этап 2. Построение СКС для отфильтрованного сигнала $\hat{f}^{filt}(t)$ и вычисление его производной $S'_{f,\alpha}(t)$.

Этап 3. Вычисление оценки ИПФ $\hat{K}(t)$. Входной сигнал $x(t)$ задаётся в виде скачка произвольной амплитуды A и представляется с помощью функции Хевисайда $x(t) = A \cdot e(t)$. Оценка ИПФ строится на основе известной формулы обращения⁸:

$$\hat{K}(t) = \frac{1}{A} \cdot S'_{f,\alpha}(t), t \in [0, T]. \quad (6)$$

В п. 2.5 рассматривается построение устойчивого **Алгоритма-2 идентификации ИПФ линейного объекта при произвольном входном воздействии.**

Этап 1 (опциональный). Предварительная обработка зашумлённых сигналов $\tilde{x}(t), \tilde{f}(t)$ алгоритмом пороговой вейвлет-фильтрации или КФ.

Этап 2. Построение СКС для отфильтрованных сигналов $\hat{x}^{filt}(t), \hat{f}^{filt}(t)$ и вычисление производных $S'_{x,\alpha}(t), S'_{f,\alpha}(t)$. В случае входного сигнала $\tilde{x}(t)$ произвольной формы от уравнения (1) можно перейти к интегральному уравнению Вольтерра II рода. С учётом вычисленных производных $S'_{x,\alpha}(t), S'_{f,\alpha}(t)$, интегральное уравнение Вольтерра II рода принимает вид

⁸ Апарцин, А.С. Неклассические уравнения Вольтерра I рода : теория, численные методы / А.С. Апарцин. – Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 193 с.

$$K(t) + \frac{1}{S_{x,\alpha}(0)} \cdot \int_0^t S'_{x,\alpha}(t-s) \cdot K(s) ds = \frac{S'_{f,\alpha}(t)}{S_{x,\alpha}(0)}, \quad t \in [0, T]. \quad (7)$$

Этап 3. Вычисление интеграла свёртки в уравнении (7).

Этап 4. Аппроксимация интегрального уравнения Вольтерра II рода в представлении (7) конечномерной СЛАУ

$$\left(I + \frac{1}{S_{x,\alpha}(0)} \cdot \Phi' \right) \cdot \hat{K} = \frac{1}{S_{x,\alpha}(0)} \cdot f',$$

где I – единичная матрица размерности $(N-1) \times (N-1)$, а элементы матрицы Φ' размерности

$$(N-1) \times (N-1): \Phi'_{i,j} = \begin{cases} \int_{t_{i+1-j}}^{t_{i+2-j}} S'_{x,\alpha}(s) ds, & \text{если } j \leq i, \\ 0, & \text{если } j > i. \end{cases}$$

Этап 5. Вычисление оценки ИПФ $\hat{K}(t)$:

$$\hat{K} = \left(I + \frac{1}{S_{x,\alpha}(0)} \cdot \Phi' \right)^{-1} \cdot \frac{f'}{S_{x,\alpha}(0)}. \quad (8)$$

П. 2.6 посвящён применению разработанных Алгоритмов-1, -2 для решения практических задач идентификации переходных процессов теплообмена элементов СОМ «ВН-ВЕНТ-ПОМ». Оценки ИПФ $\hat{K}_1(t)$, $\hat{K}_3(t)$ вычисляются по формуле (6) по зашумлённым исходным данным $\tilde{f}_1(t)$, $\tilde{f}_3(t)$ при скачкообразных входных воздействиях $x_1(t)$, $x_3(t)$ на основе Алгоритма-1. Оценки ИПФ $\hat{K}_2(t)$ вычисляются по формуле (8) по зашумлённым исходным данным $\tilde{f}_2(t)$ при произвольном зашумлённом входном воздействии $\tilde{x}_2(t)$ на основе Алгоритма-2.

Для проверки адекватности найденных решений и верификации принятых интегральных моделей (1), (7) решаются прямые задачи, которые заключаются в вычислении оценок выходных сигналов $\hat{f}_1(t)$, $\hat{f}_2(t)$, $\hat{f}_3(t)$ на основе найденных оценок ИПФ $\hat{K}_1(t)$, $\hat{K}_2(t)$, $\hat{K}_3(t)$ при соответствующих входных возмущениях. На Рисунке 8 показаны решения прямых задач – реакции теплового потока $\hat{f}_1(t)$, $\hat{f}_2(t)$, $\hat{f}_3(t)$ (сплошные кривые) на входные возмущения для ВН, ВЕНТ и УСТ соответственно. Исходные экспериментальные характеристики Q_h^r , Q_f^r , Q_s^r , принимаемые в качестве эталонных для ВН, ВЕНТ и УСТ, показаны на Рисунке 8 точечными кривыми.

Невязки теоретически построенных переходных процессов и процессов, построенных на основе натуральных данных, составили для ВН $E = 0,010$, для ВЕНТ $E = 0,032$, для УСТ $E = 0,014$.

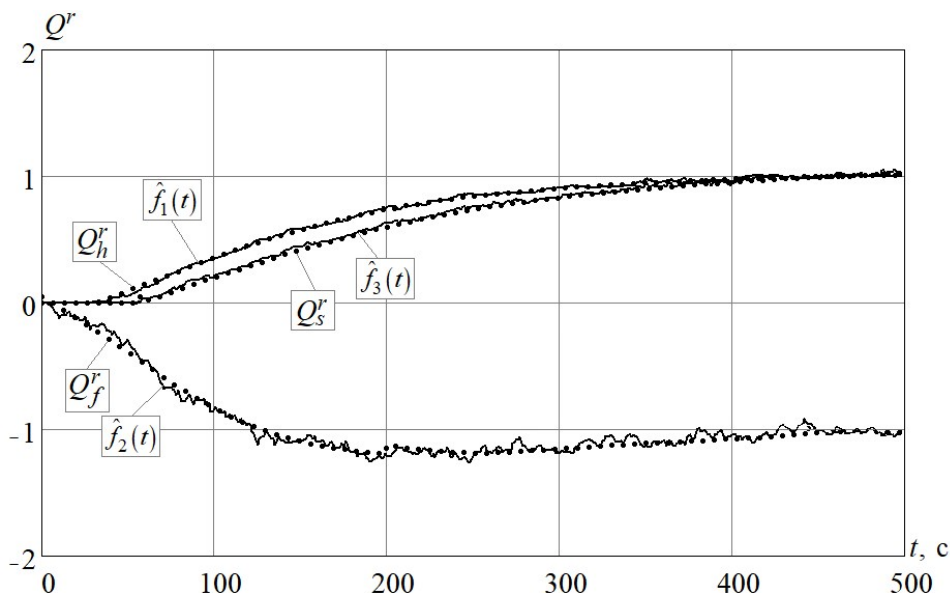


Рисунок 8 – Экспериментальные и теоретические зависимости изменений относительной избыточной теплоты исследуемых объектов во времени при разогреве потока

Третья глава посвящена разработке алгоритма 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 п. 3.1, 3.2 приводятся постановки задач непараметрической идентификации динамики теплообменника и конденсатора на участке пароводяного тракта энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт. Задача непараметрической идентификации переходных характеристик теплообменника и конденсатора заключается в построении оценки $\hat{K}_2(s_1, s_2)$ квадратичного ядра модели (2) по зарегистрированным значениям откликов $y^A(t)$, $y^{-A}(t)$, полученным с помощью имитационных моделей, описанных в п. 1.3, на скачкообразные соответствующие входные сигналы вида (3). При этом отклик $f_2(t, \omega)$ квадратичного члена квадратичного полинома Вольтерра (2) вычисляется согласно соотношению

$$f_2(t, \omega) = \frac{y^A(t, \omega) + y^{-A}(t, \omega)}{2 \cdot A^2}, \quad t, \omega \in \Delta_2. \quad (9)$$

В п. 3.3 излагается методика построения СБС для вычисления устойчивых частных и смешанных производных второго порядка зашумлённого сигнала с выбором параметров сглаживания и различными комбинациями КУ (4), (5), задаваемыми исходя из специфики решаемой задачи. Вводятся новые понятия скалярного и векторного параметров сглаживания. Для **скалярного параметра сглаживания** вычисляется одна величина параметра по всему набору сплайнов $\alpha 1^{(i)} = \alpha 1, \alpha 2^{(i)} = \alpha 2, \alpha 3^{(j)} = \alpha 3, \alpha 4^{(i)} = \alpha 4$. Для **векторного параметра сглаживания** вычисляется свой параметр для каждого сплайна из набора, и из них формируется вектор параметров сглаживания: $\overline{\alpha 1} = \{ \alpha 1^{(i)} \}, \overline{\alpha 2} = \{ \alpha 2^{(i)} \}, \overline{\alpha 3} = \{ \alpha 3^{(j)} \}, \overline{\alpha 4} = \{ \alpha 4^{(i)} \}$. Исследуется эффективность скалярных и векторных параметров сглаживания при построении СБС 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.

В п. 3.4 рассматривается построение устойчивого **Алгоритма-3 идентификации ядра К2 квадратичного полинома Вольтерра**.

Этап 1 (опциональный). Предварительная обработка зашумлённого сигнала $\tilde{f}_2(t, \omega)$ двумерным КФ.

Этапы 2, 3. Построение СБС для отфильтрованного сигнала $\hat{F}_2^{КФ}$ и вычисление частной и смешанной производных второго порядка $f_{\omega^2}''(t, \omega), f_{2t\omega}''(t, \omega)$ с помощью СБС.

Этап 4. Вычисление оценки симметричного двумерного ядра $\hat{K}_2(s_1, s_2)$ согласно формуле обращения:

$$\hat{K}_2(t, t - \omega) = \hat{K}_2(t - \omega, t) = \frac{S 4_{f, \alpha 4^{(i)}}^{(i)}(\omega) + S 2_{f, \alpha 2^{(i)}}^{(i)}(\omega)}{2}, t, \omega \in \Delta_2. \quad (10)$$

Этап 5 (опциональный). Постобработка найденного решения $\hat{K}_2(s_1, s_2)$ двумерным КФ.

П. 3.5 посвящён применению разработанного Алгоритма-3 для решения практической задачи идентификации переходной характеристики, определяющей динамику на выходе из теплообменника. Проводится верификация используемой для описания исследуемого объекта интегральной модели (2) на тестовых сигналах из семейств, использующихся для идентификации. Рассматривается влияние шума измерений в исходных данных задачи на точность идентификации.

Оценка квадратичного ядра $\hat{K}_2(s_1, s_2)$ вычисляется согласно формуле обращения (10) на основе Алгоритма-3. На Рисунках 9, 10 показаны тестовое ядро $K_2(s_1, s_2)$, построенное по экспериментальным данным на основе имитационной модели и принимаемое в качестве эталонного, и вычисленная с помощью Алгоритма-3 оценка $\hat{K}_2(s_1, s_2)$ соответственно в изолиниях. Относительная ошибка идентификации составляет $\delta_K = 5,467 \times 10^{-3}$.

Проверка адекватности построенной математической модели и эффективности разработанного Алгоритма-3 выполняется при решении прямой задачи нахождения оценки изменения энтальпии $\hat{\Delta i}(t, \omega)$ на выходе из теплообменника на основе найденной оценки ядра $\hat{K}_2(s_1, s_2)$ путём её сравнения с изменением энтальпии $\Delta i(t, \omega)$, принимаемым в качестве эталонного. Невязка откликов теплообменника $\Delta i(t, \omega)$, $\hat{\Delta i}(t, \omega)$ принимает значение $E = 3,042 \times 10^{-3}$.

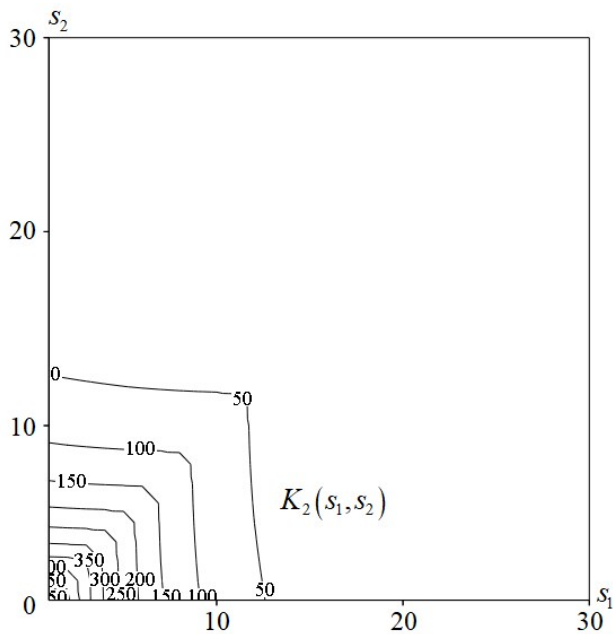


Рисунок 9 – Тестовое ядро $K_2(s_1, s_2)$

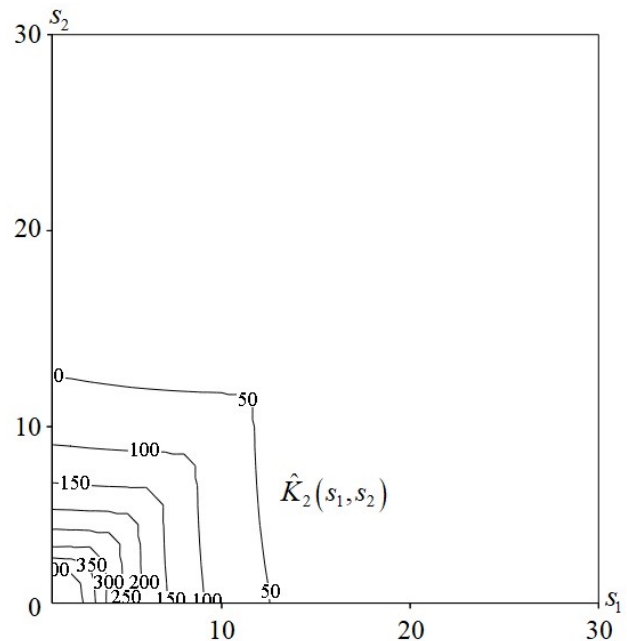


Рисунок 10 – Оценка ядра $\hat{K}_2(s_1, s_2)$

П. 3.6 посвящён применению разработанного Алгоритма-3 для решения практической задачи идентификации переходной характеристики, определяющей динамику на выходе из конденсатора на участке пароводяного тракта энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт. Выполняется проверка адекватности математической модели исследуемого объекта на основе его имитационной модели.

Оценка квадратичного ядра $\hat{K}_2(s_1, s_2)$ вычисляется согласно формуле обращения (10) на основе Алгоритма-3. На Рисунке 11 показана оценка $\hat{K}_2(s_1, s_2)$, вычисленная с помощью Алгоритма-3. Проверка адекватности построенной математической модели и эффективности разработанного Алгоритма-3 идентификации выполняется при решении прямой задачи нахождения оценки изменения давления $\hat{\Delta p}(t, \omega)$ на выходе из теплообменника на основе найденной оценки ядра $\hat{K}_2(s_1, s_2)$ путём её сравнения с изменением давления $\Delta p(t, \omega)$, принимаемым в качестве эталонного. Невязка откликов конденсатора $\Delta p(t, \omega)$, $\hat{\Delta p}(t, \omega)$ принимает значение $E = 8,906 \times 10^{-2}$.

Малые значения ошибок идентификации и невязок свидетельствуют об адекватности выбранной математической модели (2) для описания теплообменных элементов, о высокой точности найденных оценок $\hat{K}_2(s_1, s_2)$ квадратичного ядра, а также о достоверности идентификации нелинейной динамики объектов теплоэнергетики с помощью разработанного Алгоритма-3.

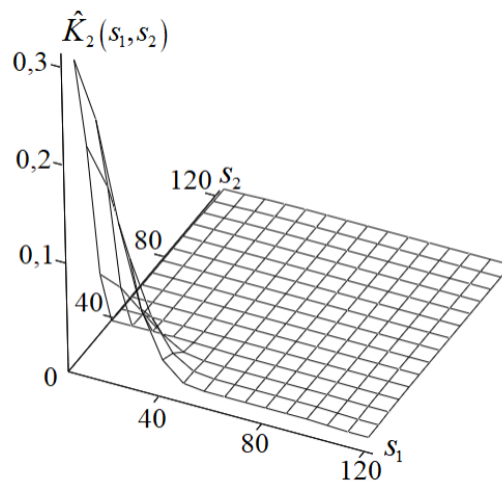


Рисунок 11 – Оценка ядра $\hat{K}_2(s_1, s_2)$

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

П. 4.1 содержит краткую характеристику разработанного программного обеспечения. Программное обеспечение разработано в математическом пакете Mathcad 15 M050 и включает в себя пакеты модулей библиотечного типа, тестовые программы и ПВК для решения практических задач идентификации. Обозначаются цели разработки и назначение пакетов

прикладных программ, кратко обсуждается состав компонентов разработанного программного обеспечения и их функциональные возможности.

В п. 4.2 рассматриваются пакеты модулей библиотечного типа, которые программно реализуют все основные вычислительные методы, используемые для построения алгоритмов идентификации.

- «Пакет модулей ЛПФ для функций одной и двух переменных» реализует работу алгоритмов ЛПФ, в частности, одномерного КФ, который используется на этапе предобработки зашумлённых данных Алгоритмов-1, -2, и двумерного КФ, который используется на этапах предобработки зашумлённых данных и постобработки найденных решений Алгоритма-3.

- «Пакет модулей построения СКС для функции одной переменной» реализует устойчивое вычисление производных первого порядка от зашумлённых сигналов аппаратом СКС при соответствующем выборе КУ и параметра сглаживания.

- «Пакет модулей построения СБС для функции двух переменных» реализует устойчивое вычисление частных и смешанных производных второго порядка от зашумлённых сигналов алгоритмами СБС при соответствующем выборе КУ и параметров сглаживания.

В п. 4.3, 4.4 рассматриваются ПВК для решения практических задач идентификации переходных характеристик линейных и нелинейных динамических объектов, реализующие работу Алгоритмов-1, -2, -3.

Прикладные ПВК осуществляют: построение интегральных моделей исследуемых объектов; математическое моделирование и проведение вычислительных экспериментов; программную реализацию разработанных Алгоритмов-1, -2, -3 идентификации; тестирование методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурного эксперимента или имитационного моделирования; решение практических задач непараметрической идентификации теплоэнергетических объектов. Разработаны ПВК: ПВК «Идентификация динамики линейных объектов» реализует Алгоритмы-1, -2 непараметрической идентификации переходных характеристик линейных динамических объектов; ПВК «Идентификация динамики нелинейных объектов» реализует Алгоритм-3 идентификации переходных характеристик нелинейных динамических объектов.

Обсуждается применение ПВК для решения задач идентификации и моделирования переходных процессов теплообмена элементов СОМ и переходных процессов элементов теплообменных систем. Программная реализация допускает модификацию исходных данных задачи, выбор алгоритма идентификации и способов учёта специфических особенностей экспериментально полученного сигнала.

Результаты диссертационной работы, представленные в гл. 1-3, полностью получены с помощью авторского программного обеспечения. Комплексы программ универсальны и могут

использоваться при решении практических задач для систем и объектов теплоэнергетики. Программные средства защищены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. «Пакет модулей построения СКС для функции одной переменной» используется в отделе измерений времени и частоты «ВНИИФТРИ» при выполнении НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ-Синхронизация» в задаче хронометрического нивелирования для обработки результатов частотно-временных измерений, имеющих высокий уровень шумов; в лаборатории № 3 «ИПФ» при выполнении прикладных научных исследований в рамках выполнения инициативной НИР «Снайпер-М» в части математического и программного обеспечения решения задачи устойчивого вычисления первой и второй производных по зашумлённым экспериментальным данным.

В заключении отражены основные результаты диссертационной работы.

1. Построены математические модели линейных теплоэнергетических объектов на основе интегральных уравнений Вольтерра I и II рода типа свёртки и математические модели нелинейных теплоэнергетических объектов на основе квадратичного полинома Вольтерра. Выполнена проверка адекватности построенных моделей по данным натурального эксперимента и имитационного моделирования.

2. Построен алгоритм устойчивого вычисления производных первого и второго порядка от экспериментальных данных с помощью аппарата сглаживающего кубического и бикубического сплайнов и доказана эффективность данного алгоритма. Сформулированы краевые условия нового типа, позволяющие задать комбинации классических краевых условий на границах построения сплайнов.

3. Подробно рассмотрен и обоснован выбор параметра сглаживания сплайна для случаев, когда имеется или отсутствует достоверная информация о характеристиках шума измерений обрабатываемого сигнала. Модифицирован статистический критерий оптимальности для оценивания оптимального параметра сглаживания сплайна при заданной величине дисперсии шума измерений. Модифицирован метод L-кривой для оценивания оптимального параметра сглаживания сплайна при неизвестной величине дисперсии шума измерений. Для построения сглаживающего бикубического сплайна введены скалярный и векторный параметры сглаживания. Представлен статистический анализ результатов соответствующих численных экспериментов. Предложены алгоритмы оценивания оптимальных скалярного и векторного параметров сглаживания, позволяющие с приемлемой точностью вычислить оценки оптимальных параметров сглаживания.

4. Разработаны новые устойчивые алгоритмы непараметрической идентификации стационарных линейных и нелинейных динамических объектов в условиях неполной априорной информации, способные учитывать специфические особенности практических задач

идентификации динамики теплоэнергетических объектов. Исследована эффективность разработанных алгоритмов и показано их применение для интерпретации натурального эксперимента в системе обеспечения микроклимата на основе построенных математических моделей.

5. Разработанные численные методы и алгоритмы реализованы в виде проблемно-ориентированных программных комплексов для решения практических задач идентификации переходных характеристик динамических объектов и проведения вычислительного эксперимента на основе данных натурального эксперимента и имитационного моделирования. Проведено тестирование работы программных комплексов при решении модельных и практических задач.

6. Решены практические задачи непараметрической идентификации динамики теплоэнергетических объектов по экспериментальным данным на основе разработанных алгоритмов идентификации средствами проблемно-ориентированных программных комплексов. Достоверность полученных решений доказана соответствием экспериментальных данных и результатов вычислительного эксперимента, адекватностью выбранных математических моделей теплоэнергетических объектов, использованием результатов диссертационной работы в учебном процессе и при выполнении научно-исследовательских работ.

В **приложении** представлены: акты внедрения результатов диссертационного исследования; список поддержанных грантами научных проектов по теме диссертационного исследования; список конференций, на которых докладывались результаты диссертационного исследования; свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК по научной специальности 1.2.2.

1. Воскобойников, Ю.Е. Выбор параметров сглаживания бикубического сплайна в задачах непараметрической идентификации / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Современные наукоёмкие технологии. – 2022. – № 2. – С. 26-32. DOI : 10.17513/snt.39032.

2. Воскобойников, Ю.Е. Идентификация квадратичного ядра уравнения Вольтерра для моделирования нелинейных динамических систем / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – Т. 85. – № 1. – С. 25-40. DOI : 10.17212/2782-2001-2022-1-25-40.

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК по другим специальностям

1. Воскобойников, Ю.Е. Новый устойчивый алгоритм непараметрической идентификации технических систем / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Современные наукоёмкие технологии. – 2019. – № 5. – С. 25-29.
2. Воскобойников, Ю.Е. Робастный алгоритм непараметрической идентификации технических систем / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Современные наукоёмкие технологии. – 2019. – № 11. – С. 38-42.
3. Боева, В.А. О целесообразности предварительной фильтрации зашумлённых сигналов в задачах идентификации / В.А. Боева // Инженерно-строительный вестн. Прикаспия. – 2019. – № 4 (30). – С. 141-145.
4. Воскобойников, Ю.Е. Алгоритмы непараметрической идентификации сложных технических систем / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Науч. вестн. НГТУ. – 2020. – № 4 (80). – С. 47-64. DOI : 10.17212/1814-1196-2020-4-47-64.
5. Воскобойников, Ю.Е. Deskриптивное сглаживание сигнала в одном алгоритме непараметрической идентификации технических систем / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Современные наукоёмкие технологии. – 2020. – № 7. – С. 24-28. DOI : 10.17513/snt.38128.
6. Боева, В.А. Непараметрическая идентификация элементов системы терморегулирования / В.А. Боева, Ю.Е. Воскобойников, Р.Ш. Мансуров // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – Т. 81. – № 1. – С. 7-20. DOI : 10.17212/2782-2001-2021-1-7-20.
7. Mansurov, R.Sh. A theoretical and experimental study of transient characteristics of the heat exchange in a thermal control system / R.Sh. Mansurov, Yu.E. Voskoboinikov, V.A. Boeva // Vestnik MGSU. – 2021. – Vol. 16. – Iss. 6. – P. 720-729. DOI : 10.22227/1997-0935.2021.6.720-729.
8. Воскобойников, Ю.Е. Устойчивый алгоритм вычисления смешанных производных в задачах непараметрической идентификации нелинейных систем / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Современные наукоёмкие технологии. – 2021. – № 4. – С. 25-29. DOI : 10.17513/snt.38610.
9. Воскобойников, Ю.Е. Выбор параметра сглаживающего кубического сплайна при неизвестных характеристиках шума измерений / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Современные наукоёмкие технологии. – 2021. – № 6-2. – С. 248-253. DOI : 10.17513/snt.38729.
10. Mansurov, R.Sh. Heat transient processes identification of the elements of internal environment system / R.Sh. Mansurov, Yu.E. Voskoboinikov, V.A. Boeva // Vestnik MGSU. – 2022. – Vol. 17. – Iss. 2. – P. 222-231. DOI : 10.22227/1997-0935.2022.2.222-231.

В изданиях, индексируемых базами WoS/Scopus

1. Воскобойников, Ю.Е. Устойчивый алгоритм непараметрической идентификации при наличии аномальных измерений / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Выч. технологии. – 2020. – Т. 25. – № 3. – С. 46-53. DOI : 10.25743/ICT.2020.25.3.006.

2. Voscoboynikov, Y. Identification of quadratic Volterra polynomials in the “input–output” models of nonlinear systems / Y. Voscoboynikov, S. Solodusha, E. Markova, E. Antipina, V. Boeva // Mathematics 10, no. 11 : 1836. – 2022. DOI : <https://doi.org/10.3390/math10111836>.

В трудах конференций, индексируемых базами WoS/Scopus

1. Voskoboinikov, Yu.E. Synthesis of smoothing cubic spline in non-parametric identification technical systems' algorithm / Yu.E. Voskoboinikov, V.A. Boeva // IOP Conf. ser. : Materials Science and Eng. XIII Int. Scientific Conf. Architecture and Construction. – 2020. – 953 (2020) 012035. DOI : 10.1088/1757-899X/953/1/012035.

2. Voskoboinikov, Yu.E. Synthesis of a smoothing bicubic spline for differentiating experimental data of nonparametric identification / Yu.E. Voskoboinikov, V.A. Boeva // J. of Phys. : Conf. Ser. Intelligent Inf. Technology and Math. Modeling 2021 (ИТММ 2021). – 2021. – 2131 032023. DOI : 10.1088/1742-6596/2131/3/032023.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Боева, В.А. Идентификация переходных процессов теплообмена в системе обеспечения микроклимата / В.А. Боева, Р.Ш. Мансуров // Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2022616376. Правообладатели : ФГБОУ ВО «НГАСУ (Сибстрин)», В.А. Боева, Р.Ш. Мансуров. № 2022615304; заявл. 25.03.2022; зарегистр. 08.04.2022; опубл. 08.04.2022, 1 с.

2. Воскобойников, Ю.Е. Пакет модулей локально-пространственной фильтрации для функций одной и двух переменных / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2021669414. Правообладатели : ФГБОУ ВО «НГАСУ (Сибстрин)», Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева. № 2021668686; заявл. 19.11.2021; зарегистр. 29.11.2021; опубл. 29.11.2021, 1 с.

3. Воскобойников, Ю.Е. Пакет модулей фильтрации сглаживающими бикубическими сплайнами для функции двух переменных / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2022616377. Правообладатели : ФГБОУ ВО «НГАСУ (Сибстрин)», Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева. № 2022615282; заявл. 25.03.2022; зарегистр. 08.04.2022; опубл. 08.04.2022, 1 с.

4. Воскобойников, Ю.Е. Пакет модулей фильтрации сглаживающими кубическими сплайнами для функции одной переменной / Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева // Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2021669320. Правообладатели : ФГБОУ ВО «НГАСУ

(Сибстрин)», Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева. № 2021668684; заявл. 19.11.2021; зарегистр. 26.11.2021; опубл. 26.11.2021, 1 с.

Отпечатано в типографии «ДубльПринт»
664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14, оф. 112
Заказ №3473, тираж 100 экз.