

На правах рукописи



АРТЕМОВА СВЕТЛАНА ВАЛЕРЬЕВНА

**МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ
ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ**

Специальность 05.11.16
«Информационно-измерительные и управляющие
системы (технические науки)»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук

ТАМБОВ 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ») на кафедре «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем».

Официальные оппоненты:

Жулев Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»,
кафедра «Информационно-измерительная и биомедицинская техника»,
заведующий кафедрой

Нефедьев Дмитрий Иванович,
доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», кафедра «Информационно-измерительная техника»,
заведующий кафедрой

Мелентьев Владимир Сергеевич,
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», кафедра «Информационно-измерительная техника»,
заведующий кафедрой

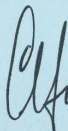
Ведущая организация
ФГУП «Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии»

Защита состоится 18 сентября 2014 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1, ауд. 60.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «ТГТУ» www.tstu.ru.

Автореферат разослан 17 июня 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Селиванова Зоя Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из приоритетов научно-технического прогресса на современном этапе во всем мире стала проблема энерго- и ресурсопотребления. Развитие отечественной промышленности и других отраслей производства ведет к значительному росту потребления топливно-энергетических ресурсов. В то же время в мире быстро сокращаются запасы высокоэнергетического сырья и растет стоимость производства энергии.

Низкая конкурентоспособность большинства отечественной продукции связана как с постоянным удорожением топливно-энергетических ресурсов, так и с неэффективным их использованием. Преобразование энергии в различных установках происходит с достаточно низким кпд (8...10% в подвижных и 25...30% в стационарных установках). В результате огромное количество тепла идет на подогрев воды, почвы, воздуха. Важно учитывать, что энергоемкость (Вт/кг) процессов зависит от их производительности. Поэтому в энергоемких отраслях промышленности остро стоят вопросы модернизации производственных процессов и управления ими по энергетическим и качественным показателям.

К наиболее энергоемким объектам управления относятся тепло-технологические аппараты (ТТА), широко применяемые в металлургии, машиностроении, пищевой, легкой, химической, лесоперерабатывающей, строительной промышленности, а также в сельском, жилищно-коммунальном хозяйстве, авто- и авиационной. Тепло-технологические аппараты представляют собой одно- или многокамерные устройства, в пределах которых осуществляются все стадии тепло-технологического процесса. Имеются четыре основных класса ТТА: печи, сушильные, холодильные и котельные установки.

В качестве основных особенностей ТТА, как объектов управления, можно выделить следующие: большие затраты энергетических и топливных ресурсов; высокие требования к поддержанию температурных режимов; наличие в аппаратах нескольких камер, влияющих друг на друга; различная природа дестабилизирующих факторов (ДФ), действующих в каналах управления и измерения; наличие таких изменений технологических режимов, для которых невозможен пересчет их параметров в реальном масштабе времени; использование различных критериев, характеризующих ведение технологических процессов с точки зрения энерго-, ресурсосбережения и качества производимой продукции; вектор управления может содержать два типа компонентов (действующих на аппарат в целом и отдельно по его камерам); необходимость введения интеллектуальной составляющей в процесс управления.

Основными показателями эффективности функционирования ТТА являются энергосбережение, качество получаемого продукта и производительность технологического процесса. В рамках модернизации различных отраслей производства с целью повышения эффективности функционирования ТТА необходимо разработать и внедрить интеллектуальную информационно-управляющую систему (ИИУС), инвариантную различным ТТА и позволяющую оперативно вырабатывать управляющие воздействия, минимизирующие энерго- или ресурсопотребление в динамических режимах и потери качества, производительности тепло-технологических процессов. Под ИИУС будем понимать совокупность техниче-

ских, программных и информационных средств, обеспечивающую решение задач анализа и синтеза управления в режимах работы ТТА в реальном масштабе времени без участия лица, принимающего решение (ЛПР). Интеллектуализация разработанной системы заключается в алгоритмизации синтеза управляющих воздействий в различных режимах работы.

Применение подобных систем в промышленности позволяет сокращать энерго- и ресурсопотребление на 5...30%, продлевать срок эксплуатации технологического оборудования ТТА и достигать заданного уровня качества выпускаемой продукции без снижения производительности технологического процесса.

Степень разработанности. Теоретические основы интеллектуальных систем представлены рядом известных публикаций, авторами которых являются Д. А. Поспелов, И. М. Макаров, В. А. Геловани, В. П. Евменов, К. А. Пупков, Н. А. Кузнецов, В. П. Мешалкин, Д. Ф. Люггер, В. А. Виттих, Б. Г. Ильясов, А. В. Каляев, В. В. Липаев, В. И. Матов, А. С. Нариньяни, Я. А. Хетагуров, Д. В. Гаскаров, М. Минский и др. Основу теоретической базы исследования составили научные труды отечественных и зарубежных авторов: Л. С. Понтрягина, А. А. Красовского, А. М. Летова, В. В. Кафарова, Р. Беллмана, А. М. Цыкунова, В. В. Денисенко и др. Теоретические и практические вопросы идентификации объектов и систем управления рассматривались в работах таких ученых, как В. В. Солодовников, В. Я. Ротач, А. М. Жандаров и др.

Научная проблема: минимизация энерго- и ресурсопотребления, потерь качества производимой продукции и производительности технологических процессов на основе разработки методологии алгоритмизации синтеза управляющих воздействий в реальном масштабе времени для ИИУС различными ТТА, функционирующими на множестве состояний.

Объект исследования: интеллектуальные информационно-управляющие системы тепло-технологическими аппаратами.

Предмет исследования: оперативный синтез управления тепло-технологическими процессами и инвариантность разработанной ИИУС различным ТТА.

Цель научного исследования: обеспечение ресурсо- и энергосбережения, минимизация потерь качества производимой продукции и производительности тепло-технологических процессов путем разработки и внедрения методологии построения ИИУС, инвариантной различным ТТА, позволяющей оперативно синтезировать управляющее воздействие по энергетическим и качественным критериям.

Задачи научного исследования. Для достижения поставленной цели исследования требуется:

1. Разработать методологию построения ИИУС, инвариантную различным ТТА, позволяющую оперативно решать задачи управления режимами по качественным, энергетическим и другим критериям.
2. Разработать метод алгоритмизации синтеза управляющих воздействий.
3. Создать модели и алгоритмы управления различными режимами ТТА.
4. Разработать методику построения альтернативных архитектур ИИУС ТТА.
5. Создать ИИУС для двух типов ТТА (вальцеленточные сушильные установки типа СВЛ и печи термоотжига магнитопроводов типа ТОМ-1), и проверить эффективность разработанной методологии их построения.

Научная новизна работы.

1. Разработана методология построения ИИУС, позволяющих синтезировать управляющие воздействия в реальном масштабе времени с учетом множества состояний функционирования ТТА. Использование ИИУС ТТА позволяет снижать потери качества производимой продукции и производительности технологических процессов, а также энерго- и ресурсопотребление. Созданная методология инвариантна различным ТТА. Она включает, в частности, последовательное выполнение следующих этапов: анализ предметной области, постановка задач, моделирование, анализ задач управления и синтез параметров управления, алгоритмизация, *первые введенный этап* алгоритмизации синтеза решения задач управления, построение альтернативных архитектур, программная и аппаратная реализация.

2. Разработан метод построения интегрированного графа алгоритмизации синтеза решения задач управления режимами «Пуск» и «Процесс» ТТА, отличающийся тем, что в пространстве состояний вершины графа – фреймы знаний, ребра графа – передаваемая и получаемая информация. Вершины графа располагаются на различных уровнях абстракции – стратах (стадиях технологии алгоритмизации синтеза решения задач управления). Интегрированный граф содержит следующие страты: информационной модели всего ТТА, информационных моделей объектов управления, классов задач управления на множестве состояний функционирования, режимов работы, целей управления, математических моделей объектов, стратегий управления, особенностей задач управления, анализа и синтеза задач управления.

3. Создана методика синтеза управления режимами ТТА с учетом множества состояний функционирования, применением описания аналитических и процедурных моделей, пригодных для решения задач управления, метода синтезирующих переменных для оперативного получения вида функций оптимального управления и их параметров, которая отличается поставленными и решенными

- *задачами* моделирования и управления:

- идентификации детерминированных моделей в виде дифференциальных уравнений с разрывной правой частью вариативной структуры, адекватно описывающих динамические режимы;

- разработки аналитических моделей трудно формализуемых процессов ТТА в виде нейронных сетей;

- создания процедурной модели оценки меры доверия к достижению требуемых значений на выходе ТТА;

- созданными *алгоритмами*:

- энерго- и ресурсосберегающего управления режимом «Пуск» с учетом смены состояния функционирования в процессе эксплуатации, взаимного влияния соседних камер ТТА и дестабилизирующих факторов, действующих по каналам управления и измерения;

- управления режимом «Процесс» с целью минимизации потерь качества и производительности, учитывающим смену состояния функционирования и влияние большого числа возмущающих воздействий, и отличающимся введением классов ситуаций и применением нечеткого вывода по производственным правилам, соответствующим введенным классам.

4. Разработана методика построения альтернативных архитектур ИИУС, включающая создание интегрированного графа алгоритмизации синтеза решения

задач управления режимами ТТА. Постановка задачи отличается использованными критериями, ограничениями и введенными переменными формализации задач.

Вводятся переменные: массивы принадлежности информационного элемента алгоритму соответствующих подсистем, массивы принадлежности алгоритма программному модулю, массивы взаимосвязи модулей с информационными элементами.

Используются ограничения: на полноту информации (общее число алгоритмов в составе синтезируемого функционального программного модуля), на однократность включения алгоритма в программные модули, на дублирование занимаемой памяти информационными элементами в различных алгоритмах, на сложность информационного интерфейса между отдельными модулями.

Минимизируются критерии: приведенных затрат (общая стоимость, состоящая из стоимостей разработки функциональных программных модулей, системной отладки, создания баз данных, создания баз знаний, разработки сценариев диалога, технических средств, программного обеспечения, приведенной стоимости эксплуатации); пригодности использования технического средства; количества технических средств; объема занимаемой памяти. Задача решается с использованием генетических алгоритмов.

5. Разработан метод бесконтактного косвенного измерения влажности пастообразного материала в процессе его сушки, заключающийся в получении сигналов с множества датчиков, установленных в n -й камере, с наибольшим влагосъемом, подачей нормированных сигналов на входы обученной нейронной сети и получением с выхода сети оценки влажности. Обучение нейронной сети организуют по измеряемым значениям с допустимой погрешностью контролируемых величин с адаптацией к диапазону влажности n -й камеры с фиксированной точностью. Метод положен в основу функционирования созданного интеллектуального датчика влажности (ИДВ).

6. Разработан метод выбора параметров режима сушки пастообразных материалов в многокамерных СВЛ с изменением скорости движения пластинчатого конвейера. Метод заключается в том, что в реальном масштабе времени с использованием ИДВ (п. 5) оценивается влажность материала в n -й и $(n + 1)$ -й камерах и проверяется попадание рассчитанных значений влажности материала в нормированные диапазоны, в зависимости от которых определяются числовые оценки мер доверия достижения требуемой влажности материала на выходе сушильной установки. Метод отличается тем, что на основании полученных значений влажности материала в указанных камерах и числовых оценок мер доверия производится вывод по продукционным правилам, определяющий значение, на которое изменяется скорость движения пластинчатого конвейера для достижения требуемого качества материала на выходе сушильной установки.

7. По методике п. 3 разработаны модели и алгоритмы управления для конкретных ТТА: а) модель динамики вариативной структуры для разогрева технологической установки отжига магнитопроводов, с ее учетом – синтезированы энергосберегающие программы управления; б) модель динамики многокамерной сушильной установки вальцеленточного типа, учитывающая возмущающие воздействия со стороны соседних камер, на ее основе – синтезированы ресурсосберегающие программы управления; в) аналитические модели, основанные на нейронных сетях, учитывающие изменения управляющих и возмущающих воздействий, пригодные для син-

теза управляющих воздействий в режиме сушки в СВЛ, отличающиеся определением влажности движущегося материала в различных точках по длине СВЛ.

В совокупности разработанные методики, методы и алгоритмы составляют методологию построения ИИУС, инвариантной различным ТТА и позволяющей в реальном масштабе времени минимизировать потери топливно-энергетических ресурсов и потери качества и производительности.

Теоретическая и практическая значимость. Создана методология построения ИИУС, позволяющих в реальном масштабе времени синтезировать решения задач управления режимами ТТА по качественным и энергетическим критериям. Разработан интегрированный граф алгоритмизации синтеза решения задач управления режимами ТТА. Разработаны алгоритмы идентификации процессов моделями, пригодными для решения задач управления режимами ТТА. Разработан метод измерения влажности, реализуемый в созданном ИДВ, позволяющем производить оценку влажности пастообразных материалов с приемлемой для решения задач погрешностью. Разработан метод выбора параметров режима сушки в СВЛ с целью минимизации потерь качества и производительности.

Внедрение созданных ИИУС позволило увеличить при управлении режимом «Процесс» многокамерными сушильными установками вероятность выхода качественного пастообразного материала до 0,98 и при этом повысить производительность процесса сушки на 5%, а при управлении режимом «Запуск» снизить ресурсопотребление на 5...10%. Использование полученных алгоритмов при управлении установкой отжига магнитопроводов в режиме «Запуск» без ухудшения качества производимой продукции позволило снизить энергозатраты на 5...15%.

Методология и методы исследования. Созданная методология построения ИИУС ТТА основана на методологиях создания автоматизированных систем оптимального управления, анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем и интеллектуальных систем. При решении задач проектирования ИИУС ТТА используются традиционные концепции, теории и методы системного анализа, математического моделирования, искусственного интеллекта, дифференциальных уравнений, оптимального управления, многокритериальной оптимизации, электрических измерений, фильтрации, нечетких множеств, нейронных сетей, генетических алгоритмов, стратифицированной иерархии, раздела комбинаторной топологии – линейных направленных графов; а также информационных технологий и технологий объектно-ориентированного программирования, алгоритмов поиска решения задачи в пространстве состояний.

Положения, выносимые на защиту:

1. Научно обоснованная методология построения ИИУС ТТА, являющаяся развитием методологий синтеза управляющих воздействий, анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем, и отличающаяся вновь введенным этапом алгоритмизации синтеза решения задач управления, и позволяющая в реальном масштабе времени синтезировать управляющее воздействие по энергетическим и качественным критериям.

2. Синтез решений задач управления режимами ТТА, основанный на интегрированном графе, представляющим собой дерево, и нахождением в нем оптимального пути. Граф характеризуется тем, что описывает в пространстве состоя-

ний решения рассматриваемых задач. Вершины графа – состояния решения задач, представленные фреймами знаний; ребра графа – передаваемая и получаемая информация. Вершины располагаются на различных уровнях абстракции – стратах (стадиях технологии интеллектуализации синтеза решения задач управления). Имеются следующие страты: информационная модель всего ТТА, информационные модели объектов управления, классы задач управления на множестве состояний функционирования, режимы работы, цели управления (минимизация потерь качества производимой продукции и производительности технологического процесса, энерго- и ресурсосбережение) математические модели объектов, стратегии управления, особенности задач управления, анализ и синтез задач управления.

3. Эффективность разработанной методологии построения ИИУС для двух типов ТТА (вальцеленточные сушильные установки и печи термоотжига магнитопроводов):

1) применение разработанной объектно-ориентированной ИИУС различными режимами четырех-, пяти- и шестикамерных конвективных сушильных установок вальцеленточного типа для различных СВЛ позволяет экономить от 5 до 10% энергоресурсов в динамических режимах, а также увеличить вероятность выхода качественной продукции до 0,98 и повысить производительность до 5% в процессе функционирования объекта управления;

2) разработанная объектно-ориентированная ИИУС динамическим режимом установки отжига магнитопроводов позволяет экономить от 5 до 15% электроэнергии при разогреве печи для различных типоразмеров магнитопроводов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов работы основана на четкой математической постановке задач, решение которых доведено до конечного результата, имеющего практическую реализацию. Степень достоверности обеспечивается корректным применением научных концепций системного анализа и математического моделирования, теорий анализа и синтеза систем на множестве состояний функционирования, интеллектуальных и иерархических систем, методов искусственного интеллекта и современными информационными технологиями, а также учетом представительного количества факторов, влияющих на решение проблемы, использованием исходных данных, полученных экспериментально, и сочетанием теоретических исследований с необходимым объемом экспериментальных исследований. Степень достоверности подтверждается сходимостью результатов теоретического исследования с результатами, полученными при использовании ИИУС ТТА на практике.

Основные положения диссертации были представлены в докладах на следующих международных научных конференциях: IX Международной on-line конференции TRACE MODE (Москва, 2003); IV Международном конгрессе «Машиностроительные технологии 04» (Варна, Болгария, 2004); Международной научно-технической конференции «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, Беларусь, 2006); VI Международной теплофизической школе (МТФШ-6) «Теплофизика в энергосбережении и управлении», (Тамбов, 2007); Международной научно-практической конференции «Vznikmoderni vedecke-2012» (Прага, Чехия, 2012); IX Международной научно-практической конференции «Strategiczne pytania światowej nauki» (Прзимисл, Чехия, 2013) и других.

Созданные методы, алгоритмы, программы и результаты исследовательской работы приняты к внедрению: на АСО «ЭЛТРА» завод низковольтной аппаратуры (г. Рассказово, 1998); АО ВНИИРТМАШ (Тамбов, 1995); ОАО «Пигмент» (Тамбов 2006, 2008); ОАО «Талвис» (Тамбов, 2012). Реализация результатов подтверждается соответствующими актами, утвержденными руководителями названных предприятий.

Диссертационное исследование частично выполнялось в рамках двух межвузовских научно-технических программ «Интеллектуальная собственность» 1999 – 2002 и «Индустрия образования» 2001 – 2003, двух грантов РФФИ 08-07-97505 р_центр_а 2008 – 2010, 12-08-00352-а 2012 – 2014, а также поддержано грантом РФФИ 14-08-00198 2014 – 2016.

Результаты диссертации опубликованы в 51 работе, в том числе монография, 21 статья в изданиях из перечня ВАК, 5 статей в реферируемых международных изданиях, 8 статей в межвузовских и вузовских журналах, 14 статей в материалах международных и всероссийских конференций, 2 патента.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения. Основная часть работы изложена на 344 страницах и содержит 55 рисунков и 30 таблиц. К основному тексту добавлен список условных обозначений и сокращений, список используемых источников, включающий 288 позиций, и семь приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приведены результаты реализации и апробации, структура работы и краткое содержание глав.

В первой главе **«Информационно-измерительные и управляющие системы тепло-технологическими аппаратами и проблемы их построения»** содержится анализ литературных источников по существующим системам энерго- и ресурсосберегающего управления. При построении концептуальной модели предметной области введены следующие допущения: ТТА рассматриваются как взаимосвязанные совокупности оборудования их составляющие (как правило, в состав ТТА входит оборудование для подачи тепла и оборудование, осуществляющее движение рабочих органов); при постановке и решении задач анализа и синтеза управления на множестве состояний функционирования различаются такие режимы работы оборудования, как «Пуск» и «Процесс». Под режимом «Пуск» понимаются управляемые динамические процессы запуска оборудования, а под режимом «Процесс» – управляемые статические процессы функционирования ТТА.

Оборудование ТТА может потреблять различные виды энергии. В режиме «Пуск» от вида энергоносителя зависит минимизируемый функционал. Если используется электроэнергия, то в качестве функционала рассматривается минимум затрат энергии, а если в качестве теплоагентов используются высокоорганические теплоносители, пар или продукты сжигания жидкого и газообразного топлива, то в качестве функционала берется «расход топлива». Непрерывно возрастают требования к качеству выпускаемой продукции и производительности тепло-технологического процесса в режиме «Процесс», что приводит к необходимости минимизировать функционал Φ :

$$\Phi = Q(\Delta Qp, \Delta Pz, \bar{x}, \bar{u}) \rightarrow \min_{\bar{u}}, \quad (1)$$

где $\Delta Qp, \Delta Pz$ – потери, вызванные снижением качества конечной продукции и производительности тепло-технологического процесса; \bar{x}, \bar{u} – векторы возмущающих и управляющих воздействий.

Действующие на объекты управления дестабилизирующие факторы (ДФ) оказывают существенное влияние на работу ИИУС ТТА, в частности, снижают точность выхода на заданные технологические режимы, приводят к увеличению потребления энергоресурсов и погрешностям при оценке параметров математических моделей, описывающих динамические режимы работы. Поэтому важно при анализе и синтезе ИИУС учитывать влияние ДФ.

ТТА как объекты управления обычно представляют собой нелинейные системы с распределенными параметрами. Традиционно для управления процессами решаются системы дифференциальных уравнений в частных производных, содержащих эмпирические коэффициенты, это затрудняет оперативное получение их решения. Поэтому при определении основных параметров управляемого процесса принято использовать упрощенные инженерные методы, имеющие большие погрешности вычислений, что может приводить к нежелательным последствиям. В связи с этим подобные методы не могут быть пригодны при решении задач управления. Однако технология современного искусственного интеллекта позволяет находить решение задач управления подобными объектами.

Интеллектуализация разработанной системы базируется на применении методов искусственного интеллекта при решении задач алгоритмизации синтеза управляющих воздействий, минимизирующих энерго- и ресурсопотребление, потери качества и производительности в реальном масштабе времени без участия ЛПР.

Вторая глава **«Методологические основы построения интеллектуальной информационно-управляющей системы тепло-технологическими аппаратами»** посвящена разработке и развитию методологических основ синтеза ИИУС ТТА. Методология построения ИИУС ТТА является естественным развитием методологий создания автоматизированных систем оптимального управления, модульного построения автоматизированных информационно-управляющих систем обработки данных и интеллектуальных систем.

Важным на этапе анализа предметной области является определение множества состояний функционирования ТТА. Множество состояний функционирования (МСФ) \mathcal{H} дает возможность при описании моделей объектов рассматривать условия их работы с комплексным учетом воздействия внешней окружающей среды и другими факторами, имеющими детерминированную, или вероятностную, или нечеткую природу. Множество состояний функционирования есть декартово произведение множеств режимов работы (\mathcal{H}^{PP}) и состояний работоспособности (\mathcal{H}^{CP}). Факторы, воздействующие на состояния функционирования из множества \mathcal{H}^{PP} , подразделяются на внутренние ($H_i^{PM}, i = \overline{1, n}$), связанные с изменением вида и параметров моделей, и внешние (H^k, H^{OC}), косвенно влияющие на управ-

ляющие воздействия: H^k – изменения качества топливной смеси, давление пара, напряжения и частоты питающей сети и т.п., H^{OC} – изменения окружающей среды (температура, влажность, давление и т.д.). Таким образом, множество состояний функционирования режимов работы ТТА можно записать в виде $\mathcal{H}^{PP} = H_1^{PM} \times \dots \times H_n^{PM} \times H^k \times H^{OC}$. Множество состояний работоспособности $\{H_{вер}, H_{кр}\} \subset \mathcal{H}^{CP}$ содержит $H_{вер}$ – наиболее вероятные и $H_{кр}$ – критические состояния (с отказами технических средств).

Значения переменной h , описывающей различные состояния функционирования исследуемого объекта, задается кортежем $h = \langle h^{PP}, h^{CP} \rangle$, где $h^{PP} \in \mathcal{H}^{PP}$, $h^{CP} \in \mathcal{H}^{CP}$. Изменение состояния h происходит в том случае, когда меняется значение хотя бы одной компоненты кортежа. При разработке ИИУС ТТА создается алгоритмическое и программное обеспечение, содержащее используемые при безотказной работе оборудования алгоритмы управления, т.е. для наиболее вероятных состояний $h \in H_{вер}$, и возможные алгоритмы управления при отказе технических средств, т.е. при $h \in H_{кр}$.

Постановку задачи управления динамическими режимами «Пуск» объектов ТТА на МСФ в обобщенном виде можно представить следующим образом.

Задаются:

1) множество моделей текущего состояния функционирования h :

$$M_h = \{M_j, j=1, 2, \dots\}, \quad M_j: \dot{z} = F(z_h, u_h, t), \quad F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}; \quad (2)$$

2) ограничения на изменение фазовых координат z_h , управляющих воздействий u_h и минимизируемый функционал, т.е.

$$z(t_{0h}) = z_{0h} \rightarrow z(t_{kh}) = z_{kh}, \quad (3)$$

$$\forall t \in [t_{0h}, t_{kh}]: u(t_h) \in [u_{nh}, u_{bh}], \quad (4)$$

$$J = \int_{t_{0h}}^{t_{kh}} g(t, z(t_h), u(t_h)) dt \rightarrow \min_u, \quad (5)$$

где \dot{z} – производная по времени; z_{0h} – начальное вектора фазовых координат и его конечное состояние – z_{kh} ; u_{nh} – нижняя граница и u_{bh} – верхняя граница управления; t_{0h} – начальное и t_{kh} – конечное время; J – минимизируемый функционал; F – множество отображающих функций.

Необходимо найти с учетом текущего состояния функционирования h рабочую модель $\dot{z} = F_{раб}(z_h, u_h, t_h)$, $F_{раб} \in F$; массив параметров задачи $\mathfrak{X} = \{A, B, z_{0h}, z_{kh}, u_{nh}, u_{bh}, t_{0h}, t_{kh}, h\}$; определить стратегию управления перевес-

ти за фиксированный интервал времени из исходного состояния z_{0h} в конечное состояние z_{kh} при имеющемся ограничении (4) на управляющее воздействие при этом, минимизируя функционал (5) и с учетом текущего состояния функционирования h . Здесь A и B – параметры модели.

Найти решение задачи (2) – (5) – это значит, для заданного массива \mathfrak{X} исходных данных найти вид функции управления $u^*(t_h)$, $t \in [t_{0h}, t_{kh}]$ и вычислить параметры этой функции, рассчитать оптимальную траекторию изменения фазовых координат $z^*(t_h)$, а также минимизировать функционал J , в качестве которого, в зависимости от управляемого процесса, выбирают функционал «расход топлива»

$$J_T = \int_{t_{0h}}^{t_{kh}} |u(t_h)| dt \rightarrow \min_u \text{ или функционал } J_3 = \int_{t_{0h}}^{t_{kh}} u^2(t_h) dt \rightarrow \min_u \text{ «затраты энергии»}.$$

В главе сформулирована в общем виде постановка задач управления в режиме «Процесс».

Известны три случая представления основных уравнений изменения переменных системы управления при наличии ДФ. Коэффициенты наличия ДФ – \hbar , λ могут принимать значения 0 или 1 в зависимости от наличия или отсутствия помех. В первом случае ($j = 1$) присутствуют помехи по каналу управления и $\hbar = 0$, $\lambda = 1$. При $j = 2$ имеем $\hbar = 1$, $\lambda = 0$, т.е. присутствуют помехи по каналу измерения, и в случае $j = 3$, $\hbar = 1$, $\lambda = 1$ – помехи по каналам управления и измерения. При этом модель динамики объекта M_{hj} , $j = 1, 2, 3$ в дискретной форме задается в виде уравнений состояния и наблюдения.

Решение большинства задач, в том числе трудно формализуемых, в ИИУС ТТА связано с применением методов искусственного интеллекта и производится на основе использования баз данных и знаний информационно-измерительной и информационно-управляющей подсистем, что позволяет расширить их функциональные возможности. В качестве модели баз данных ($M_{БД}$) используется реляционная модель, которая позволяет структурировать необходимую информацию в удобном для хранения, дополнения и использования всеми частями системы виде. Модели баз знаний ($M_{БЗ}$) поддерживают работу с сетевыми, продукционными и фреймовыми представлениями знаний.

Модели представления данных и знаний для информационно-измерительной и информационно-управляющей подсистем различны, поэтому возникает необходимость создавать базы данных и знаний соответственно для каждой подсистемы. Это дает возможность работы измерительной подсистемы автономно и независимо от управляющей, что повышает ее мобильность, а также позволяет выполнять функции мониторинга параметров управляемого процесса.

Важной является проблема структурного построения проектных решений ИИУС с учетом оптимальности параметров по заданным критериям и ограничений на характеристики синтезируемых подсистем. Она формулируется следующим образом:

следует найти проектное решение архитектуры ИИУС ТТА $\gamma^* = \min\{S(\gamma) \mid \gamma \in \Gamma\}$, где $\gamma = (M_{\text{ТТА}}, M_{\text{ИУПС}}, M_{\text{ИИПС}}, M_{\text{ИИ}}, M_{\text{БД}}, M_{\text{БЗ}}, S_{\text{св}})$ – вариант архитектуры, где M_v , $v \in \{\text{ТТА}, \text{ИУПС}, \text{ИИПС}, \text{ИИ}\}$ – информационные модели представления соответственно: ТТА; информационно-управляющей подсистемы, информационно-измерительной подсистемы, интеллектуального интерфейса; $S_{\text{св}}$ – матрица информационных связей между моделями M_v ; Γ – множество вариантов архитектур ИИУС ТТА. В качестве целевой функции предложен критерий приведенных затрат, зависящий от принимаемых проектных решений $S(\gamma) = \min(S^{\text{ФПМ}} + S^{\text{OC}} + S^{\text{БД}} + S^{\text{БЗ}} + S^{\text{ДС}} + S^{\text{ТС}} + S^{\text{Р}} + S^{\text{Э}})$, где $S(\gamma)$ – общая стоимость; стоимости: $S^{\text{ФПМ}}$ – разработки функциональных программных модулей, S^{OC} – отладки системы, $S^{\text{БД}}$ – создания баз данных, $S^{\text{БЗ}}$ – создания баз знаний, $S^{\text{ДС}}$ – разработки сценариев диалога с пользователями, $S^{\text{ТС}}$ – технических средств системы, $S^{\text{Р}}$ – создания программного обеспечения, $S^{\text{Э}}$ – приведенная стоимость эксплуатации ИИУС.

Для формализации задачи структурного построения вводятся следующие переменные: массивы принадлежности алгоритма модулю, массивы принадлежности информационного элемента алгоритму соответствующих подсистем, массивы взаимодействия модулей с информационными элементами. На этапе проектирования минимизируются следующие основные критерии: сложность системы, подбор и количество технических средств, объем занимаемой памяти с ограничениями на общее число алгоритмов в составе синтезируемого функционального программного модуля, на однократность включения алгоритма в программные модули, на дублирование занимаемой памяти информационными элементами в различных алгоритмах. Поставленная задача решена с использованием генетических алгоритмов.

Для решения задачи параметрической идентификации моделей слабо формализованных задач использовались нейронные сети. Для обработки потоков информации, определения функционирования и распознавания классов управления, а также синтеза управляющего воздействия применялись объектно-ориентированное представление знаний фреймами, семантическая сеть, представленная в виде И–ИЛИ графа и представление знаний правилами продукций.

Целью решения задачи алгоритмизации синтеза является получение управляющих воздействий, минимизирующих заданные функционалы. Технология алгоритмизации синтеза, реализованная в виде И–ИЛИ графа, отражает представление множества задач алгоритмизации синтеза управления ТТА в пространстве состояний (рис. 1).

В пространстве состояний вершины графа соответствуют состояниям решения задач и представляют собой фреймы знаний, оперирование которыми реализуется с использованием алгоритмов функциональных программных модулей, а ребра графа – это информация, передаваемая и получаемая в результате их работы. Вершины графа предлагается располагать на различных уровнях абстракции – стратах. Каждый уровень – это этап решения задачи алгоритмизации синтеза.

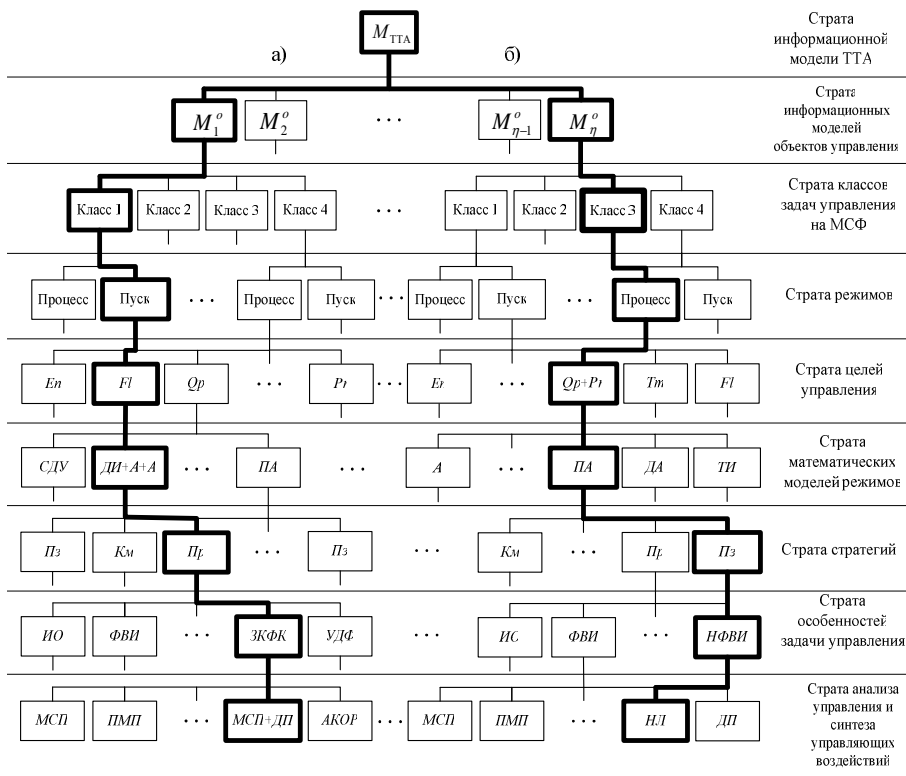


Рис. 1. Интегрированный граф метода алгоритмизации синтеза управляющих воздействий

Две верхние страты предназначены для идентификации информационных моделей ТТА и информационных моделей объектов управления. Страта классов задач управления на МСФ характеризует особенности решения задач. Страты режимов и целей предназначены для определения функционала, соответствующего заданной цели управления; здесь E_n, Fl, Q_p, P_r, T_m – энерго- и ресурсосбережение, качество и производительность, быстродействие соответственно. В зависимости от режима работы объекта цель управления может меняться.

Страта математических моделей режимов идентифицирует модель, пригодную для решения задач управления. Причем процедуры модулей идентификации позволяют по заданным экспериментальным данным подобрать наиболее адекватную модель исследуемого режима. Модели могут быть представлены в виде: ДУ – систем дифференциальных уравнений в частных производных с граничными условиями; ПА – процедурно-аналитических моделей (нейронные сети и т.д.); А – апериодического звена, ДИ – двойного интегратора; ДА – двойного апериоди-

ческого звена, ТИ – тройного интегратора, а также систем дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, например, ДА + ДА, ДИ + А + А и т.д.

Страта стратегий предлагает следующие стратегии реализации управления Кр – расширенную стратегию управления, Пр – программную, Пз – позиционную и Км – комбинированные стратегии управления и их разновидности.

Страта особенностей задач управления содержит процедуры, позволяющие решать задачи с учетом: интегральных ограничений (ИО), фиксированным и нефиксированным временным интервалом управления (ФВИ и НФВИ), закрепленными и незакрепленными концами траектории фазовых координат (ЗКФК и НКФК), фиксированными и интервальными параметрами моделей объектов (ФП и ИП), с учетом дестабилизирующих факторов (УДФ) и т.д. Страта анализа управления и синтеза управляющих воздействий содержит процедуры реализации методов: синтезирующих переменных (МСП), аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), динамического программирования (ДП), комбинированных методов (МСП + ДП), принципа максимума Понтрягина (ПМП) и т.д. Приведенная технология позволяет оперативно синтезировать решения задач управления ИИУС без участия ЛППР.

Построение рабочих прототипов ИИУС ТТА проводится на базе исследовательского прототипа ИИУС ТТА. При этом идентифицируется модель предметной области рабочего прототипа конкретного ТТА. Решая задачу нахождения проектного решения, определяется рабочий прототип ИИУС ТТА.

Третья глава **«Модели и задачи интеллектуальных информационно-управляющих систем тепло-технологическими аппаратами»** посвящена идентификации моделей, используемых в режимах «Пуск» и «Процесс». Модели объектов в ИИУС ТТА представляются на МСФ.

Модели режима «Пуск» идентифицируются по следующей методике. Задаются совокупности экспериментальных данных динамики объекта, отражающие связь входных воздействий u и выходных переменных y , т.е. $\{u(t_i) = u_i; y(t_i) = y_i; i = 1, 2, \dots\}$; множество базовых моделей, для которых решены задачи полного анализа на МСФ $M = \{M_j, j = 1, 2, \dots\}$ (здесь каждая модель содержит дифференциальное уравнение $\dot{z} = f_j(z, u, t)$ и отображающую функцию $\tilde{y}(t) = \phi_j(\tilde{z}(t))$); постановка решаемой задачи управления. На основе особенностей задачи управления и функционирования объекта определяются требования к точности и сложности модели. Требования к точности могут формулироваться в виде удовлетворения условию на допустимую величину ошибки $E(t_i) = y(t_i) - \tilde{y}(t_i)$, т.е. $\max_{t_i} |E(t_i)| \leq E_{\text{доп}}$ или минимума функционала \mathcal{E} от ошибки $E(t)$ при ограничении

на сложность модели $\mathcal{E} = \int_{t_0}^{t_k} q(E(t)) dt \rightarrow \min$, где \tilde{y} – расчетное значение y по

модели; $E_{\text{доп}}$ – допустимая величина ошибки; q – функция ошибки, обычно квадратичная. Решение поставленной задачи, в результате которого определяется мо-

дель объекта, пригодная для решения задачи управления и удовлетворяющая требованиям точности, предполагает: идентификацию структуры модели, оценку ее параметров и проверку адекватности на МСФ. В главе приводятся алгоритмы решения задачи идентификации и проверки адекватности моделей в виде дифференциальных уравнений с разрывной правой частью вариативной структуры.

Наибольшую сложность представляет идентификация моделей режима «Процесс» ТГА. Для решения этой проблемы предлагается подход, использующий методы искусственного интеллекта.

Например, при управлении процессом с целью минимизации потерь качества продукта и производительности в СВЛ необходимо производить оценку влажности движущегося пастообразного материала в процессе его сушки. Исходя из особенностей процессов в СВЛ, организация оценки влажности пастообразного материала в камерах сушильной установки в реальном времени точными измерительными устройствами представляется весьма затруднительной. Поэтому в работе предлагается метод, который заключается в измерении датчиками множества факторов, влияющих на процесс сушки пастообразного материала и оценки влажности материала в процессе его сушки по аналитической модели (6).

Измерения проводят группами датчиков – общими и датчиками, установленными в i -й камере самой напряженной по влагосъему. В контролируемой камере снимается основная или поверхностная влага. Обеспечение притока сушильного агента в камеру осуществляется через воздухозаборное окно. Сушильный агент подогревается в паровом калорифере, а отработанный отводится с помощью сбросного шиберов посредством вытяжного вентилятора, работающего в циклическом режиме. Включение вентилятора происходит по достижению заданной максимальной, а выключение – по достижению заданной минимальной влажности сушильного агента. Сигналы, поступающие с датчиков, нормализовав, подают на входы заранее обученной нейронной сети, с выхода которой в реальном режиме времени получают оценку текущей влажности материала в i -ой камере.

Общие датчики предназначены для определения влажности и температуры окружающей среды, включения/выключения вытяжного вентилятора, наличия/отсутствия ворошителя, скорости движения пластинчатого конвейера. Датчики, установленные в i -ой камере предназначены для определения влажности и температуры сушильного агента, степени открытия воздухозаборного окна и шиберов. На основании информации, полученной от датчиков и известного значения начальной влажности материала, рассчитывают значения входов нейронной сети.

Входами сети являются нормализованные значения: x_1 – начальной влажности материала; x_2, x_3 – температуры и влажности окружающей среды; x_4 – скорости движения пластинчатого конвейера; x_5 – наличия или отсутствия ворошителя; x_6 – временной доли работы вытяжного вентилятора; x_7, x_8 – средневзвешенных температуры и влажности сушильного агента в n камере; x_9, x_{10} – процента открытия воздухозаборного окна и сбросного шиберов. Обучение нейронной сети организуют по образцовым мерам технологических параметров в адаптивном диапазоне i камеры с фиксированной точностью.

Аналитическая модель оценки влажности материала в i камере, представляет собой нейронную сеть, которая имеет архитектуру многослойного персептрона. Нейронная сеть обучена по алгоритму обратного распространения ошибки, и ее можно представить в виде

$$\bar{\varphi}_i = \left[1 + \exp \left(-\beta_{\text{ВЫХ}}^{(i)} \left[\sum_{j=1}^{N_i} w_j^{(i \text{ ВЫХ})} \left(1 + \exp \left(-\beta_j^{(i)} \left[w_{1,j}^{(i)} \bar{x}_1 + w_{2,j}^{(i)} \bar{x}_2 + w_{3,j}^{(i)} \bar{x}_3 + w_{4,j}^{(i)} \bar{x}_4 + w_{5,j}^{(i)} \bar{x}_5 + w_{6,j}^{(i)} \bar{x}_6 + w_{7,j}^{(i)} \bar{x}_7 + w_{8,j}^{(i)} \bar{x}_8 + w_{9,j}^{(i)} \bar{x}_9 + w_{10,j}^{(i)} \bar{x}_{10} \right] - \theta_j^{(i)} \right) \right] - \theta_{\text{ВЫХ}}^{(i)} \right) \right]^{-1}, \quad (6)$$

где $\bar{\varphi}_i$ – нормализованная влажность материала, i – номер камеры; параметры сигмоидальных активационных функций $\theta_{\text{ВЫХ}}^{(i)}$, $\theta_j^{(i)}$ – сдвиги и $\beta_{\text{ВЫХ}}^{(i)}$, $\beta_j^{(i)}$ – углы наклона нейронов выходного и скрытого слоев нейронной сети; N_i – число нейронов в скрытом слое сети; $w_j^{(n \text{ ВЫХ})}$, $w_{i,j}^{(n)}$ – весовые коэффициенты связей нейронов выходного и скрытого слоев нейронной сети. Выходной сигнал сети денормализуется для получения в натуральном масштабе значения φ_i влажности материала.

Полученная аналитическая зависимость (6) позволяет оценивать влажность материала в процессе его сушки в i камере сушильной установки в реальном масштабе времени с относительной погрешностью не превышающей 2%. Аналогично строятся модели и для других камер.

Оценку меры доверия к достижению требуемых значений на выходе ТТА проводят по процедурной модели, построенной с применением метода Демпстера–Шафера.

В четвертой главе «Анализ и синтез управляющих воздействий на множестве состояний функционирования» приводятся результаты теоретических исследований по полному анализу и интеллектуальному синтезу управления, минимизирующему функционалы расход топлива и затраты энергии для режима «Пуск» и функционала потери качества выпускаемой продукции и производительности ТТА в режиме «Процесс».

Исследование режимов «Пуск» показывает, что модели динамики тепло-технологического оборудования могут быть представлены в кусочно-линейной форме, одна или несколько зон которых описываются инерционным объектом первого порядка, имеющим следующий вид:

•

$z = a_h z(t) + b_h u(t)$, где a_h и b_h – параметры объекта управления в состоянии h . Из литературных источников известно, что с помощью этого объекта можно описать динамические процессы, с учетом запаздывания, а также разгон двигателей. В состоянии $h \in H$ условия управляемости применительно к задаче (2) – (5) определяются следующим образом: решение

задачи (5) в состоянии h на интервале времени $[\theta_{0h}, t_{kh}]$ существует, если существует управление $u(t_h)$, которое удовлетворяет одновременно ограничению (4) и условию достижения конечного состояния:

$$\int_{\theta_h}^{t_{kh}} e^{a_h(t_{kh}-t)} u(t_h) dt = \frac{1}{b_h} (z_{kh} - z_{0h} e^{a_h(t_{kh}-\theta_h)}). \quad (7)$$

Лемма 1. Если в задаче (2) – (5) минимизируемый функционал есть затраты энергии и для состояния $h \in H$ решение ее существует, то существует и единственное управляющее воздействие; при этом оно принадлежит к одному из следующих множеств функций: $u^*(t) \in (\mu(u_{гр}) \vee \mu_c(\exp) \vee \mu_h(\exp, u_{гр}) \vee \mu_h(u_{гр}, \exp))$; где $\mu(u_{гр})$ – постоянные функции, т.е. $u^*(t) = \text{const}$; $\mu_c(\exp)$ – строго монотонная экспоненциальная функция; $\mu_h(\exp, u_{гр})$ – не строго монотонная функция, убывающая (возрастающая) экспоненциальная функция до времени переключения и постоянная функция после времени переключения; $\mu_h(u_{гр}, \exp)$ – не строго монотонная функция, постоянная функция до времени переключения и убывающая (возрастающая) экспоненциальная функция после времени переключения; $u_{гр}$ – граничные значения управления.

Следствие леммы 1. Если решение задачи управления с массивом реквизитов $r = (a_h, b_h, t_{0h}, t_{kh}, z_{0h}, z_{kh}, u_{nh}, u_{vh})$ существует, то функция управления может иметь один из следующих видов:

- 1) $\mu(u_{гр})$: $u_1^*(t) = u_{гр}, t \in [t_0, t_k]$; $u_2^*(t) = -u_{гр}, t \in [t_0, t_k]$;
- 2) $\mu_c(\exp)$: $u_3^*(t) = u_0 + d_3 e^{-a(t-t_0)}$; $u_0 < u_3^*(t_0) < u_3^*(t_k)$;
 $u_4^*(t) = u_0 + d_4 e^{-a(t-t_0)}$; $u_4^*(t_k) < u_4^*(t_0) < u_0$;
 $u_5^*(t) = u_0 + d_5 e^{-a(t-t_0)}$; $u_0 < u_5^*(t_k) < u_5^*(t_0)$;
 $u_6^*(t) = u_0 + d_6 e^{-a(t-t_0)}$; $u_6^*(t_0) < u_6^*(t_k) < u_0$;
- 3) $\mu_h(\exp, u_{гр})$: $u_7^*(t) = \begin{cases} d_7 e^{-a(t-t_0)} + u_0, & t \in [t_0, t_7], \\ u_B, & t \in [t_7, t_k]; \end{cases}$
 $u_8^*(t) = \begin{cases} d_8 e^{-a(t-t_0)} + u_0, & t \in [t_0, t_8], \\ u_H, & t \in [t_8, t_k]; \end{cases} \quad (8)$
- 4) $\mu_h(u_{гр}, \exp)$: $u_9^*(t) = \begin{cases} u_B, & t \in [t_0, t_9], \\ d_9 e^{-a(t-t_9)} + u_0, & t \in [t_9, t_k]; \end{cases}$

$$u_{10}^*(t) = \begin{cases} u_n, & t \in [t_0, t_{10}), \\ d_{10} e^{-a(t-t_{10})} + u_0, & t \in [t_{10}, t_k]; \end{cases}$$

здесь $u_0 = \frac{u_b + u_n}{2}$, $d_i, i = 1..10$ – параметры функций управления.

С целью упрощения определения вида и параметров функции управления вводятся нормированная задача управления и синтезирующие переменные. В нормированной задаче временной интервал и область допустимых управлений постоянны, т.е. $\forall h \in H$, нормированное время $T \in [0; 2]$, а нормированное управление $-1 \leq |U(T_h)| \leq 1$.

Лемма 2. Если для инерционного объекта первого порядка и исходной задачи (2) – (5) с функционалом J_3 введена нормированная задача управления

$$\dot{Z} = AZ(T/h) + BU(T_h) + B_0, \quad T \in [0; 2], \quad U(T_h) \in [-1; 1], \quad J = \int_0^2 U^2(T_h) dT_h \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $A = a_n \frac{\Delta t}{2}$, $B = b_h \Delta t \Delta u / 4$, $B_0 = B(u_{bh} + u_{nh}) / \Delta u$, $\Delta t = t_{kh} - t_{0h}$, $\Delta u = u_{bh} - u_{nh}$, и в качестве синтезирующих переменных используются

$$L = (z_h^k - z_h^0 e^{2A}) / B - B_0(e^{2A} - 1) / AB \quad \vee \quad L = \int_0^2 e^{A(2-T)} U(T_h) dT_h \quad \wedge \quad A, \quad (10)$$

то: 1) решение задачи управления существует, если

$$L_{\min}(A) \leq L \leq L_{\max}(A); \quad (11)$$

здесь $L_{\min}(A) = -\frac{(e^{2A} - 1)}{A}$, $L_{\max}(A) = \frac{(e^{2A} - 1)}{A}$;

2) значения синтезирующих переменных A и L однозначно определяют вид функций управления $U^*(T_h)$ и их параметры; где T_h – нормированное время;

3) между функциями управления исходной задачи $u_i^*(t_h)$, $i = \overline{1, 10}$ и функциями нормированной задачи $U_i^*(T_h)$ имеется однозначное соответствие, т.е. задачи (2) – (5) и (9) являются эквивалентными.

Определение. Множество значений (L, A) (см. (10)) в плоскости синтезирующих переменных, для которых имеет место функция управления $U_i^*(T_h)$, образует область существования i -го вида управления. Зависимости видов функций управления U_i^* от значения синтезирующих переменных L и A представлены

на рис. 2, где k_i – область существования i -го вида функции управления; l_i – граница областей; U, T – нормированные значения управления и времени.

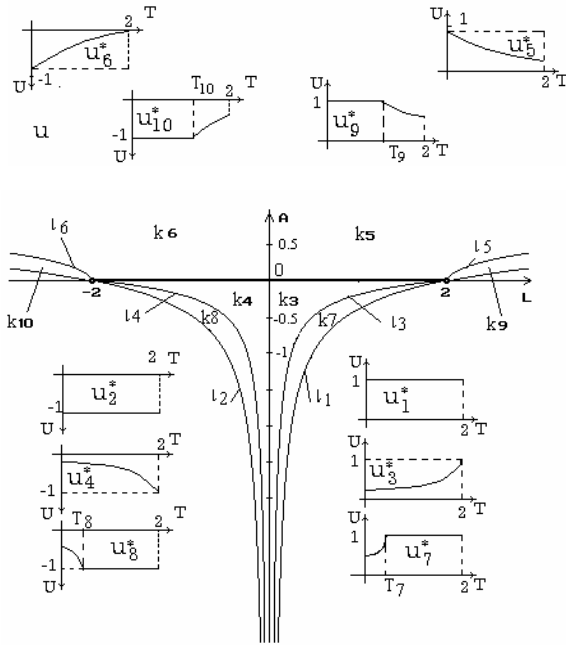


Рис. 2. Области существования управления и виды функций управления

Задача управления с *зонной* моделью формулируются аналогично задаче (2) – (5), массив реквизитов для нее имеет вид

$$\tilde{R} = (a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_m, z_0, z_k, z_1, \dots, z_{m-1}, u_n, u_b, t_0, t_k, J). \quad (12)$$

Следует отметить, что для различных *зон* границы u_n, u_b могут быть различными. При рассмотрении задачи управления на МСФ могут меняться любые компоненты массива \tilde{R} , а также число *зон* $m, a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_m$ – параметры модели *зон*.

Введение нормированной задачи и синтезирующих переменных позволило получить простые формулы для расчета параметров функций управления непосредственно по массиву исходных данных.

Программная и аппаратная реализации результатов анализа задачи управления на МСФ с использованием метода синтезирующих переменных позволяют создавать интеллектуальные ИИУС ТТА, оперативно синтезирующие управляющие воздействия с учетом изменения состояния функционирования в режиме «Пуск».

Определение. Интеллектуальным синтезом называется оперативный синтез управляющих воздействий при реальной эксплуатации ИИУС ТТА без ЛПП.

Интеллектуальный синтез управляющих воздействий на МСФ в режиме «Пуск» производится следующим образом: определяются реквизиты задачи управления для момента переключения θ с использованием массива реквизитов; затем рассчитываются реквизиты нормированной задачи и значения синтезирующих переменных L, A ; с помощью соотношений (10) и (11) проверяется выполнение условий существования решения задачи управления при исходных данных текущего состояния функционирования; если решение задачи управления существует, то по значениям L, A определяется вид функции управления; для выделенного вида управления рассчитываются параметры $U^*(T_h)$ нормированной задачи (9), а затем параметры функции $u^*(t_h)$ реальной задачи.

В соответствии с постановкой задачи интеллектуального синтеза управляющих воздействий время выполнения этих операций не должно превышать Δt_c – время синтеза. Для большинства практических задач это требование выполняется, так как на всех операциях расчеты производятся по конечным формулам. Оперативность интеллектуального синтеза управляющих воздействий может быть достигнута за счет совершенствования поиска вида функции $u^*(t_h)$. Для сокращения времени на поиск предварительно из базы знаний выделяются возможные виды функций управления, которые могут иметь место на МСФ для объекта управления.

Анализ и интеллектуальный синтез управляющих воздействий на МСФ режима «Процесс» проводятся с учетом особенностей процессов, происходящих в конкретном ТГА. Рассмотрим анализ управления на МСФ на примере СВЛ. При проектировании ИИУС ТГА за элементы множества \mathcal{H} всех возможных траекторий изменения состояний функционирования $h_i(\cdot)$ выбираем величины отклонений значений влажности материала для i -й камеры от требуемых регламентом значений влажности \bar{y}_i . Вектор выходных переменных для контролируемых n -й и $(n+1)$ -й камер сушильной установки имеет вид $y = (\varphi_{i=n}, \varphi_{i+1=n+1}, m(\varphi_k^k))$. Множество \mathcal{H} задают в виде морфологической таблицы, элемент $h_l(\cdot) \in \mathcal{H}$ этой таблицы имеет три компоненты $h_l(\cdot) = (h_i, h_{i+1}, h_{lk})$, две из которых h_{ln}, h_{ln+1} принимают одно из пяти возможных значений, а компонента h_{lk} – одно из трех:

$$h_{li} = \begin{cases} h_{li}^{\text{ННД}}, & \text{если } y_i < (\bar{y}_i - \delta_i^{(2)}); \\ h_{li}^{\text{НД}}, & \text{если } y_i \in [\bar{y}_i - \delta_i^{(2)}, \bar{y}_i - \delta_i^{(1)}]; \\ h_{li}^{\text{Д}}, & \text{если } y_i \in [\bar{y}_i - \delta_i^{(1)}, \bar{y}_i + \delta_i^{(1)}]; \\ h_{li}^{\text{ВД}}, & \text{если } y_i \in (\bar{y}_i + \delta_i^{(1)}, \bar{y}_i + \delta_i^{(2)}]; \\ h_{li}^{\text{НВД}}, & \text{если } y_i > (\bar{y}_i + \delta_i^{(2)}); \end{cases} \quad h_{lk} = \begin{cases} h_{lk}^{\text{H}}, & \text{если } y_k < 0,65; \\ h_{lk}^{\text{СР}}, & \text{если } y_k \in [0,65; 0,8]; \\ h_{lk}^{\text{B}}, & \text{если } y_k > 0,8, \end{cases} \quad (13)$$

где $\delta_i^{(1)}, \delta_i^{(2)}$ – задаваемые отклонения y_i от \bar{y}_i , $\delta_i^{(1)} < \delta_i^{(2)}$; N – число возможных ситуаций; k – номер конечной камеры; через ННД обозначена влажность мате-

риала, значение которой намного ниже допустимой; через НД – влажность материала, значение которой ниже допустимой; через Д – допустимая влажность материала; через ВД – влажность материала, значение которой выше допустимой; через НВД – влажность материала, значение которой намного выше допустимой; через Н обозначена низкая мера доверия; через СР – средняя мера доверия; через В – высокая мера.

Таким образом, множество \mathcal{H} содержит $N = 75$ состояний функционирования. В результате анализа выделяются следующие классы: при K_0 значения влажности материала в контролируемых камерах принадлежат допустимым диапазонам; при $K_{пр}$ влажности материала принимают значения $h_{ii}^{НД}$ или $h_{ii}^{НВД}$, при этом решается задача повышения производительности процесса с ограничением на требуемое качество производимой продукции; при K_i или K_{i+1} значение влажности в i или в $i+1$ камере выходит за допустимые пределы; при $K_{n, n+1}$ имеется отклонение значений влажности сразу в двух камерах. В зависимости от того, к какому классу принадлежит $h_l(\cdot)$, решаются различные задачи управления.

Интеллектуальный синтез управления режимом «Процесс» с применением рассмотренных классов ситуаций состоит в следующем. В текущий момент времени t для синтеза управляющих воздействий необходима следующая информация: значения влажности материала в контролируемых камерах φ_i и φ_{i+1} , определенные по аналитическим моделям вида (6) с использованием интеллектуального датчика; мера доверия к требуемой конечной влажности материала, рассчитанная по процедурной модели $m(\varphi_k^k) = \text{Алг}_{\text{ДШ}}(\varphi_i, \varphi_{i+1}, \varepsilon)$ методом Демпстера–Шафера, где ε – экспертные знания в виде числовых оценок и значений компонент вектора управления $\vec{u}(t - \Delta t)$. В памяти управляющего устройства должна находиться информация о множестве состояний функционирования, классах возможных ситуаций, системе нечетких продукционных правил, функциях принадлежности имеющих лингвистических переменных.

Пятая глава «Алгоритмы и методы интеллектуальных информационно-управляющих систем» посвящена созданию методов и алгоритмов, позволяющих осуществлять интеллектуальный синтез управляющих воздействий, в реальном режиме времени. При решении задач управления для M_{h1} (при наличии ДФ) внешние границы l_1, l_2 превращаются в «коридоры», ширина которых зависит от интенсивности помех. Рассмотрим алгоритм оптимального управления при наличии ДФ в канале управления, т.е. для вида модели M_{h1} .

Для снижения влияния ДФ α_i в канале управления введем компенсационную добавку $\tilde{\alpha}_i$, определенную путем оптимального линейного прогноза в простейшем случае по формуле

$$\tilde{\alpha}_i = \bar{\alpha} + \phi_1(\alpha_{i-1} - \bar{\alpha}), \quad (14)$$

где ϕ_1 – коэффициент корреляции.

Управляющее воздействие с учетом прогноза возмущения будет иметь следующий вид:

$$\tilde{u}_i^* = L_i y_i + \alpha_i - \tilde{\alpha}_i,$$

где L_i – оператор управления.

Выбор модели (14) обусловлен учетом требуемой точности прогнозирования и возможности ее использования простым управляющим устройством. На эффективность работы системы оказывает влияние выбор шага квантования и средне-квадратичного отклонения ДФ.

Для снижения влияния ДФ в канале измерения в случае M_{h2} оценка внутреннего состояния производится с использованием фильтра Калмана. Стратегию управления с использованием данного алгоритма назовем позиционной с оптимальной фильтрацией.

Алгоритм управления для вида модели M_{h3} представляет собой сочетание алгоритмов для моделей M_{h1} и M_{h2} , и все выводы, сделанные для этих моделей, справедливы и для модели M_{h3} .

Применение этих алгоритмов позволяет снизить энерго- и ресурсопотребление на 15...20% по сравнению с традиционными алгоритмами управления.

Интеллектуальный синтез управляющих воздействий в режиме «Процесс» в СВЛ производится по следующему алгоритму. Сначала идентифицируется состояние функционирования на основе ранее полученной информации. Затем в зависимости от состояния функционирования идентифицируется класс ситуаций, соответствующий алгоритму управления. Для класса K_0 сохраняется режим работы с выбранным на предыдущем шаге управлением $u(t - \Delta t)$. Для класса $K_{пр}$ должна быть решена задача повышения производительности ТТА с ограничением на достижение требуемого качества производимой продукции. K_i, K_{i+1} или $K_{i, i+1}$, то решаются задачи управления режимами в i и $i+1$ камерах. Алгоритм управления синтезирует управляющие воздействия при помощи нечеткой логики с использованием алгоритма Мамдани. Совокупность нечетких предикатных правил выделенных классов имеет вид для: $K_{пр}$ – если $\langle \Phi_i \text{ есть } \Phi_i^{\text{Л}} \rangle$ и $\langle \Phi_{i+1} \text{ есть } \Phi_{i+1}^{\text{Л}} \rangle$ и $\langle M_k^{\text{к}} \text{ есть } M^{\text{Л}} \rangle$, то $\langle U^{\text{сл}} \text{ есть } (U^{\text{сл}})^{\text{Л}} \rangle$; K_i – если $\langle \Phi_i \text{ есть } \Phi_i^{\text{Л}} \rangle$, то $\langle U^{\text{сл}} \text{ есть } (U^{\text{сл}})^{\text{Л}} \rangle$; K_{i+1} – если $\langle \Phi_{i+1} \text{ есть } \Phi_{i+1}^{\text{Л}} \rangle$ и $\langle M_k^{\text{к}} \text{ есть } M^{\text{Л}} \rangle$, то $\langle U^{\text{сл}} \text{ есть } (U^{\text{сл}})^{\text{Л}} \rangle$; $K_{i, i+1}$ – если $\langle \Phi_i \text{ есть } \Phi_i^{\text{Л}} \rangle$ и $\langle \Phi_{i+1} \text{ есть } \Phi_{i+1}^{\text{Л}} \rangle$ и $\langle M_k^{\text{к}} \text{ есть } M^{\text{Л}} \rangle$, то $\langle U^{\text{сл}} \text{ есть } (U^{\text{сл}})^{\text{Л}} \rangle$; здесь индекс Л обозначает значение лингвистической переменной из соответствующего классам множества. Нечеткие подмножества преобразуют тремя методами (первого максимума, центра тяжести, медианы) в численные значения управляющих воздействий. В результате этого преобразования получают множества значений $\{\Delta u_1^{\text{сл}}, \Delta u_2^{\text{сл}}, \Delta u_3^{\text{сл}}\}$; здесь индекс «сл» обозначает скорость движения

пластинчатого конвейера (ленты). Это множество образует интервал допустимого изменения управляющих воздействий $u_{\text{доп}}^{\text{сл}}$. Для полученного допустимого интервала рассчитывается функционал

$$\Phi = c_1(a_0 + a_1\tilde{u}_0^{\text{сл}}) + c_2(b_0 + b_1(\tilde{u}_0^{\text{сл}})^2) \rightarrow \min_{u_0^{\text{сл}} \in u_{\text{доп}}^{\text{сл}}}, \quad (15)$$

где c_1 , c_2 – весовые коэффициенты.

В результате реализации синтезированного управляющего воздействия минимизируется функционал (15), позволяющий учесть потери производительности процесса и потери качества выпускаемой продукции при изменениях состояний функционирования.

Оценка влажности производится посредством интеллектуального датчика, в основе работы которого лежат метод оценки влажности пастообразного материала и адаптивный алгоритм функционирования. Метод оценки влажности пастообразного материала, обеспечивающий бесконтактное косвенное измерение влажности материала в реальном режиме времени, заключается в получении сигналов с множества датчиков, установленных в камере с наибольшим влажосъемом, сигналы нормируются и подаются на входы обученной нейронной сети (6), с выхода которой получается оценка влажности материала в процессе его сушки. Обучение нейронной сети организуется по образцовым мерам в адаптивном диапазоне контролируемой камеры с фиксированной точностью. В результате работы адаптивного алгоритма функционирования интеллектуальный датчик влажности представляет собой отказоустойчивую систему, в которой отказ одного из ее элементов приводит к некоторому снижению качества работы, а не к полному останову. При создании адаптивного алгоритма выбора измерительной процедуры выделялись классы ситуаций отказов датчиков, для которых обучались соответствующие нейронные сети с приемлемой для решения задач погрешностью.

В шестой главе «**Интеллектуальная информационно-управляющая система тепло-технологическими аппаратами**» дается описание математического обеспечения режимов «Пуск» и «Процесс». Математическое обеспечение режима «Пуск» отличается от классических задач оптимального управления тем, что допускает изменение параметров объекта управления, вида его модели, граничных значений для управляющих воздействий и фазовых координат. Математическое обеспечение режима «Процесс» использует методы искусственного интеллекта, что дает возможность принимать решения об управлении трудно формализуемыми тепло-технологическими процессами в реальном режиме времени. Созданное программное обеспечение ИИУС ТТА, в основе которого лежит объектно-ориентированный подход, одним из преимуществ которого является возможность разработать компоненты один раз и многократно их использовать, позволяя оперативно осуществлять построение рабочих прототипов ИИУС различных ТТА на базе исследовательского прототипа. Особое внимание в главе уделяется построению баз данных и знаний.

Структурная схема (рис. 3) и функционирование системы описывается на примере интеллектуальной информационно-управляющей системы вальцеленточными сушильными установками.

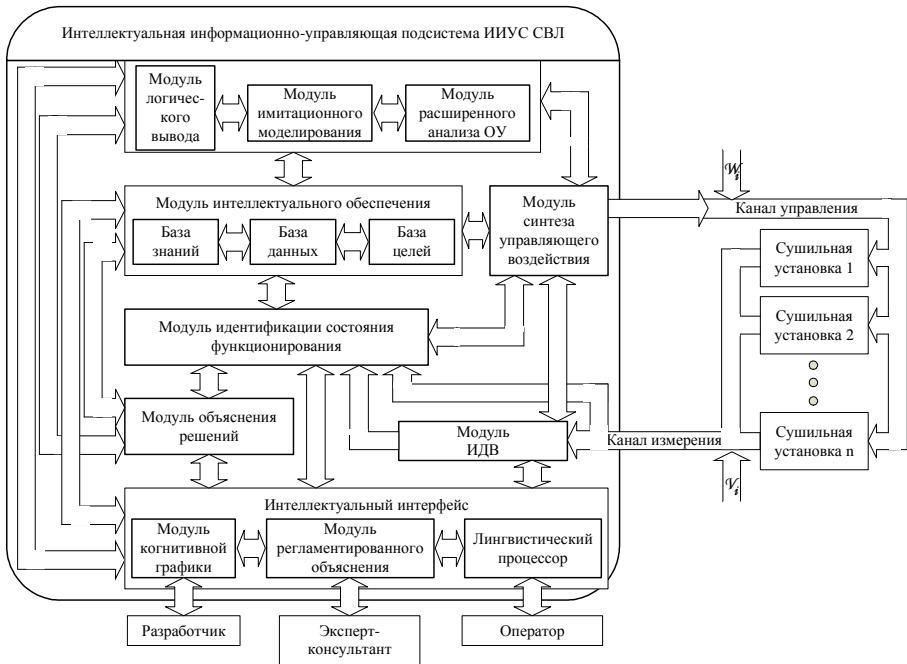


Рис. 3. Структурная схема ИИУС СВЛ

Описываются особенности технического обеспечения и техническая реализация интеллектуального датчика влажности, используемого в системе; проводится метрологический анализ.

В седьмой главе «**Применение интеллектуальных информационно-управляющих систем тепло-технологическими аппаратами в производственных условиях**» приводятся ИИУС установок отжига магнитопроводов и ИИУС вальцеленточных сушильных установок. Для каждого составляющего ТТА объекта проведены работы по идентификации моделей режимов работы, анализу и синтезу управляющих воздействий.

В процессе исследования ТТА «Установка ТОМ-1» были проанализированы все возможные состояния функционирования для процесса «Пуск» и получена трехзонная модель вида

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & a_{h_1} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b_{h_1} \end{pmatrix} u(t), & z_1 \in [18; 355]; \\ \dot{z} = a_{h_2} z(t) + b_{h_2} u(t), & z \in [355; 550]; \\ \dot{z} = a_{h_3} z(t) + b_{h_3} u(t), & z \in [550; 850]. \end{cases} \quad (16)$$

Анализ влияния ДФ предполагает использование программной стратегии управления с прогнозирующей моделью вида (14). Управление здесь ищется в виде алгоритма реализующего функцию вида (17). Расчет по приведенной функции связан с определением видов функций и расчетом параметров для каждой *зоны* отдельно и решением задачи их временной стыковки.

Задача временной стыковки заключается в определении оптимальных значений времен t_i^* переключения программ. Для их расчета используется модернизированный метод динамического программирования. От обычного метода он отличается тем, что на каждом шаге находится управляющее воздействие с использованием метода синтезирующих переменных. Кроме того, для момента времени t_1 осуществляется реализация плавного перехода скорости изменения температуры в конце первой и начале второй зон. В результате использования ИИУС синтезирован алгоритм расчета управляющих воздействий по функции, имеющей следующий вид:

$$\tilde{u}^*(\bullet) = \begin{cases} \tilde{u}_1^*(t) = 122,04 - 7,96t, & t \in [0; 13,1); \\ \tilde{u}_2^*(t) = \begin{cases} 175 + 150,2e^{0,1306(t-13,1)}, & t \in [13,1; 14,3); \\ 350, & t \in [14,3; 19); \end{cases} \\ \tilde{u}_3^*(t) = \begin{cases} 175 + 139,6e^{0,014(t-19)}, & t \in [19; 35,1); \\ 350, & t \in [35,1; 52]; \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

здесь функция $\tilde{u}_1^*(t)$ принадлежит области первого вида задачи двойного интегратора; $\tilde{u}_2^*(t)$ и $\tilde{u}_3^*(t)$ – области k_7 , представленной на рис. 2, значения u^* и z^* приведены там же.

Применение синтезированного алгоритма снижает энергозатраты на 13% по сравнению с традиционным нагревом при $u = \text{const}$.

Установка ТОМ-1 предназначена для обработки различных типоразмеров

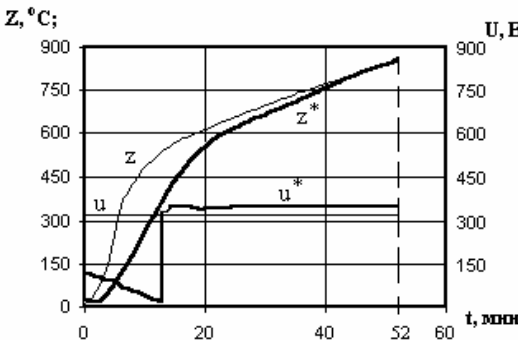


Рис. 4. Температурные зависимости и управляющие воздействия при оптимальном и традиционном управлении процессом нагрева в технологической установке ТОМ-1

магнитопроводов. На этапе анализа ТТА, с целью минимизации общего количества рабочих моделей вида (16), предложена группировка магнитопроводов по заданной температуре их отжига. Выделены четыре группы, для которых были получены модели вида (16), отличающиеся третьей зоной. Синтезируемые ИИУС оптимальные программы позволяют снизить энергозатраты на 5...15% в зависимости от группы заготовок и состояния функционирования.

В главе приводятся все возможные состояния функционирования в режимах «Пуск» и «Процесс» тепло-технологического аппарата СВЛ. Рассматриваются результаты работы ИИУС для управления пятикамерной СВЛ. В режиме «Пуск» необходимо разогреть камеры СВЛ без загрузки пастообразного материала до рабочей температуры. Здесь в качестве объектов управления рассматриваются паровые калориферы камер. Модель i -й камеры представляет собой систему дифференциальных уравнений, например, для второй камеры:

$$M_2 : \begin{pmatrix} \dot{z}_{21}^1 \\ \dot{z}_{22}^1 \\ \dot{z}_{21}^2 \\ \dot{z}_{21}^3 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0,1402 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{21}^1(t) \\ z_{22}^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,788 \end{pmatrix} u_2^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,1091 \end{pmatrix} l_2^1(t) + \\ + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,2439 \end{pmatrix} r_2^1(t), \quad z_{21}^1 \in [20; 37,1]; \\ \text{-----} \\ -0,3203z_{21}^2(t) + 0,088u_2^2(t) - 0,094l_2^2(t) + 0,733r_2^2(t), \quad z_{21}^2 \in [37,1, 56,4]; \\ \text{-----} \\ -0,1213z_{21}^3(t) + 0,2365u_2^3(t) - 0,102l_2^3(t) + 0,328r_2^3(t), \quad z_{21}^3 \in [56,4, 69,8]. \end{cases}$$

Для функционала $J_\Sigma = \sum_{i=1}^n J_i = \sum_{i=1}^n \int_{t_i^k}^{t_i^0} |u_i(t)| dt \rightarrow \min$ необходимо решить задачу

ресурсосберегающего управления (2)–(5). Требуется соблюсти условие $t_1^k = t_2^k = \dots = t_n^k$, означающее, что конечное время разогрева для всех камер одинаково (это требуется для одновременного завершения динамических режимов. Возможные отклонения во времени для различных камер проистекают из отличия технических характеристик калориферов и параметров моделей динамики). Определяются функции расчета управляющих воздействий $u_i^*(\bullet) = (u_i^*(t), t \in [t_i^0, t_i^k])$ и траектории изменения фазовых координат $z_i^*(\bullet) = (z_i^*(t), t \in [t_i^0, t_i^k] / u_i^*(t))$, соответствующие каждой камере. Получающееся множество функций $\{u_1^*(\bullet), u_2^*(\bullet), \dots, u_n^*(\bullet)\}$ для рассчитанных временных интервалов обеспечивает минимальное значение функционала J_Σ для всех камер в совокупности и обеспечивает одновременное окончание процесса разогрева. Экономия энергоресурсов при ресурсосберегающем управлении сушильной установкой составляет 5...10%.

В режиме «Процесс» целью является минимизация потерь производительности производства продукции и ее качества. На качество выпускаемого материала большое влияние оказывает процесс сушки в контролируемых камерах. Изменением времени нахождения пастообразного материала в этих камерах можно достичь необходимого качества выпускаемой продукции и повышения производительности процесса. С этой целью производится оценка влажности материала в контролируемых камерах с помощью ИДВ. По этим данным с применением метода Демпстера–Шафера рассчитываются числовые оценки мер доверия достижения требу-

мой влажности материала на выходе СВЛ. В результате производится нечеткий вывод и синтезируется необходимое управляющее воздействие, изменяющее скорость движения продуктового транспортера.

Интеллектуальная информационно-управляющая система процессами сушки, использующая интеллектуальный датчик для оценки влажности материала, внедрена на ОАО «Пигмент» (г. Тамбов), что привело к увеличению вероятности выпуска качественной продукции до 0,98 и повышению производительности процесса на 5%.

В приложении приведены теоретические сведения по анализу и синтезу управляющих воздействий применительно к объектам, динамика которых описывается аperiodическим звеном; результаты решения задач управления в режимах «Пуск» и «Процесс»; акты и справки внедрений ИИУС ТТА.

Заключение. В диссертации решена научная проблема, направленная на минимизацию энерго- и ресурсопотребления, потерь качества производимой продукции и производительности технологических процессов на основе разработки методологии алгоритмизации синтеза управляющих воздействий в реальном масштабе времени для интеллектуальных информационно-управляющих систем различными ТТА, функционирующими на множестве состояний.

Решение вышеозначенной проблемы базируется на следующих результатах диссертационного исследования:

1. Разработана методология построения ИИУС, инвариантной различным ТТА, состоящая, в частности, в исполнении этапов: анализ предметной области, постановка задачи, моделирование, анализ и синтез задач управления, алгоритмизация, впервые введенная алгоритмизация синтеза решения задач управления, построение альтернативных архитектур, программная и аппаратная реализация и основанная на применении новой технологии алгоритмизации синтеза, которая позволяет оперативно решать задачи управления режимами ТТА по качественным и энергетическим критериям.

2. Разработан метод построения интегрированного графа алгоритмизации синтеза решения задач управления, включающий представление множества задач алгоритмизации синтеза в пространстве состояний и позволяющий за счет переключения по стратам оперативно получать решения задач управления с целями ресурсо- или энергосбережения в режиме «Пуск» и минимизации потерь качества и производительности в режиме «Процесс».

3. Создана методика алгоритмизации синтеза управления, включающая следующие методы и алгоритмы: а) идентификации моделей в виде дифференциальных уравнений с разрывной правой частью вариативной структуры, адекватно описывающих динамические режимы; б) разработки аналитических моделей трудно формализуемых процессов ТТА в виде нейронных сетей; в) создания процедурных моделей оценки меры доверия к достижению требуемых значений на выходе ТТА с использованием метода Демпстера–Шафера; г) создания алгоритмов энерго- и ресурсосберегающего управления с учетом смены состояния функционирования в процессе эксплуатации, взаимного влияния соседних камер ТТА и дестабилизи-

рующих факторов, действующих по каналам управления и измерения; д) создания алгоритмов управления с целью минимизации потерь качества и производительности, учитывающих смену состояния функционирования и влияние большого числа возмущающих воздействий.

4. Разработана методика построения альтернативных архитектур ИИУС ТТА, заключающаяся в проведении анализа предметной области и создании ее информационной модели, создании интегрированного графа алгоритмизации синтеза решения задач управления и решении задачи структурного построения ИИУС ТТА в виде выбора варианта архитектуры системы.

5. Разработан метод оценки влажности пастообразного материала в процессе его сушки, позволяющий производить бесконтактное косвенное измерение с относительной погрешностью, не превышающей 2%, в условиях безотказной работы датчиков, составляющих информационно-измерительную систему. На основании применения метода разработан ИДВ.

6. Разработан метод сушки пастообразных материалов в многокамерных вальцеленточных сушильных установках с изменением скорости движения пластинчатого конвейера, заключающийся в изменении времени пребывания материала в камерах и позволяющий управлять режимом «Процесс» с целью минимизации потерь качества получаемого продукта и производительности технологического процесса.

7. С применением методики п. 3 разработаны: а) аналитические модели динамики вариативной структуры для разогрева и догрева технологической установки отжига магнитопроводов с абсолютной погрешностью не превышающей 2 °С; б) аналитические модели динамики разогрева СВЛ, учитывающие возмущающие воздействия со стороны соседних камер; в) аналитические модели оценки влажности движущего пастообразного материала в СВЛ, основанные на нейронных сетях, учитывающие изменения управляющих и возмущающих воздействий с относительной погрешностью 2%; г) процедурная модель расчета меры доверия к достижению требуемой влажности материала на выходе СВЛ по значениям влажности материала в контролируемых камерах; д) синтезированы программы управления, энергосберегающие для ТОМ-1 и ресурсосберегающие для СВЛ.

8. Результатом применения разработанной методологии построения ИИУС ТТА являются: а) объектно-ориентированная интеллектуальная информационно-управляющая система в режимах «Пуск» и «Процесс» сушильных установок (СВЛ) с учетом действующих дестабилизирующих факторов по каналам управления и измерения, учетом влияния соседних камер друг на друга и интеллектуальным синтезом управляющего воздействия. Ее применение позволяет экономить 5...10% энергоресурсов в режиме «Пуск», увеличить вероятность выхода качественной продукции до 0,98 и повысить производительность на 5% в режиме «Процесс»; б) объектно-ориентированная интеллектуальная информационно-управляющая система в режиме «Пуск», позволяющая экономить 5...15% электроэнергии при разогреве установки отжига магнитопроводов (ТОМ-1).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография:

1. **Артемова, С. В.** Информационная система оптимального управления тепло-технологическими аппаратами : монография / С. В. Артемова. – Москва–Санкт-Петербург–Вена–Гамбург : Изд-во МИНЦ, – 2011. – 234 с.

Статьи в журналах из перечня ВАК:

2. **Артемова, С. В.** Синтез управления тепло-технологическими аппаратами на основе интегрированного графа / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 3(120). – С. 15 – 23.

3. **Артемова, С. В.** Информационная технология синтеза оптимальной структуры алгоритмического обеспечения системы энергосберегающего управления / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Приборы и системы. – 2010. – № 4. – С. 14 – 19.

4. **Артемова, С. В.** База знаний оптимальной информационно-управляющей системы сушильной установки / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Программные продукты и системы. – 2012. – № 1. – С. 61 – 64.

5. **Артемова, С. В.** Решение задачи структурного построения программного обеспечения интеллектуального датчика влажности / С. В. Артемова // Программные продукты и системы. – 2013. – № 3. – С. 281 – 284.

6. **Артемова, С. В.** Система робастного энергосберегающего управления процессами нагрева / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – № 5. – С. 31 – 34.

7. **Артемова, С. В.** Система мониторинга процесса сушки с интеллектуальными датчиками влажности / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Датчики и системы. – 2009. – № 3. – С. 27 – 30.

8. **Артемова, С. В.** Информационная система мониторинга влажности материалов в процессе сушки / С. В. Артемова, А. Н. Грибков, А. Е. Ерышов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 7. – С. 46 – 50.

9. **Артемова, С. В.** Энергосберегающее управление процессом разогрева реактора с индукционным обогревом / С. В. Артемова, А. В. Неретин // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естеств. и техн. науки. – 1999. – Т. 4, вып. 4. – С. 489 – 491.

10. **Артемова, С. В.** Влияние интенсивности помех на минимизируемый функционал при энергосберегающем управлении с оптимальной фильтрацией / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев, А. Н. Грибков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, № 3. – С. 402 – 409.

11. **Артемова, С. В.** Прогнозирование и компенсация возмущения в системах оптимального управления / С. В. Артемова, А. Н. Грибков, Д. Ю. Муромцев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 632 – 637.

12. **Артемова, С. В.** Математическая модель многосекционной сушильной установки на множестве состояний функционирования / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12. – С. 969 – 974.

13. **Артемова, С. В.** Анализ задач управления процессом сушки в сушильных установках вальце-ленточного типа на множестве состояний функционирования (на англ. яз.) / С. В. Артемова, А. Н. Грибков, А. Е. Ерышов, А. С. Назаров // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 56 – 66.

14. **Артемова, С. В.** Микропроцессорная система мониторинга влажности пастообразных материалов / С. В. Артемова, А. С. Назаров, П. А. Подхватилин // ВСНИП ун-т им. В. И. Вернадского (Спец. вып. (36)). – 2011. – С. 7 – 12.

15. **Артемова, С. В.** Энергосберегающее управление технологическими процессами нагрева (на примере установки отжига магнитопроводов) / С. В. Артемова, А. А. Артемов // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2012. – Т. 17, вып. 5. – С. 1375 – 1379.

16. **Поддержка** принятия решений эргатическим элементом в условиях неопределенности методом Шортлифа-Бьюкенена / С. В. Артемова, В. И. Павлов, А. А. Артемов, Д. Ю. Муромцев // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2013. – Т. 18, вып. 4. – С. 1435 – 1439.

17. **Применение** экспертной системы для оптимального управления технологическими процессами / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев, С. Б. Ушанев, Н. Г. Чернышов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 1997. – № 1. – С. 12 – 16.

18. **Энергосберегающее** управление нагревом жидкости / В. Н. Грошев, Л. П. Орлова, С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев // Техника в сельском хозяйстве. – 1996. – № 2. – С. 27–28.

19. **Метод** исследования области существования решения задачи оптимального управления при наличии случайных возмущений (на англ. яз.) / А. Н. Грибков, С. В. Артемова, И. А. Куркин, П. А. Подхватилин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 345 – 349 .

20. **Грибков, А. Н.** Анализ и синтез оптимального управления объектом первого порядка при наличии случайных возмущений / А. Н. Грибков, С. В. Артемова // Радиотехника. – 2010. – № 5. – С. 23 – 28.

21. **Грибков, А. Н.** Алгоритм ресурсосберегающего управления динамическими режимами многосекционных сушильных установок / А. Н. Грибков, С. В. Артемова // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313, № 4. – С. 48 – 50.

22. **Грибков, А. Н.** Информационно-управляющая система сушильной установкой на базе SCADA-системы TRACEMODE / А. Н. Грибков, С. В. Артемова, В. В. Козодаева // Промышленные асу и контроллеры. – 2009. – № 2. – С. 5 – 7.

Статьи в реферируемых международных изданиях:

23. **Артемова, С. В.** Информационная технология анализа и синтеза энергосберегающего управления с использованием нечеткой логики / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Информационные системы и процессы. – Тамбов–Москва–Санкт-Петербург–Баку–Вена : Изд-во «Нобелистика». – 2003. – С. 165 – 169.

24. **Артемова, С. В.** Информационная технология энергосберегающего управления в условиях помех. Information technology for energysaving control of objects under conditions of noise / С. В. Артемова, А. Н. Грибков, Д. Ю. Муромцев //

Mechanical engineering technologies'04. Fourth international congress. September 23 – 25, 2004. Varna, Bulgaria. – 2004. – P. 127 – 129.

25. **Артемова, С. В.** Информационная технология аналитического конструирования энергосберегающего управления / С. В. Артемова, А. Н. Грибков, Д. Ю. Муромцев // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. ; под ред. проф. В. М. Тютюнника. – Тамбов–Москва–Санкт-Петербург–Баку–Вена : Изд-во «Нобелистика». – 2004. – Вып. 2(224). – С. 48 – 52.

26. **Артемова, С. В.** Задача ресурсосберегающего управления динамическими режимами многосекционных сушильных установок / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. ; под ред. проф. В. М. Тютюнника. – Тамбов–Москва–Санкт-Петербург–Баку–Вена : Изд-во «Нобелистика». – 2005. – Вып. 3(196). – С. 142 – 145.

27. **Chernyshov, N. G.** Energy saving system for technological equipment heating control / N. G. Chernyshov, S. V. Artemova // Automatic Control and Computer Sciences. – New York : Allerton Press, Inc. – 2001. – № 2.

Статьи в других журналах:

28. **Артемова, С. В.** Программное обеспечение автоматизированного рабочего места «Энергосберегающее управление процессами нагрева» / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев, А. В. Неретин // Компьютерная хроника. – 1997. – № 12. – С. 101 – 113.

29. **Артемова, С. В.** Энергосберегающее управление одним классом нелинейных объектов / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – С. 194 – 197.

30. **Артемова, С. В.** Математическое описание и расчет процесса разогрева промышленных электропечей / С. В. Артемова, В. И. Ляшков // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 1998. – С. 65 – 73.

31. **Артемова, С. В.** Расчет нестационарного температурного поля с учетом изменений коэффициента теплоотдачи в процессе теплообмена / С. В. Артемова, В. И. Ляшков, А. В. Неретин // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 1998. – С. 59 – 65.

32. **Артемова, С. В.** Математическая модель технологической установки термообработки магнитопроводов ТОМ-1 на множестве состояний функционирования / С. В. Артемова // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молод. ученых и студ. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – Вып. 5. – С. 38 – 41.

33. **Чернышов, Н. Г.** Система энергосберегающего управления процессами нагрева энергоемких объектов / Н. Г. Чернышов, С. В. Артемова // Автоматика и вычислительная техника. – 2001. – № 3. – С. 25 – 33.

34. **Артемова, С. В.** Анализ и синтез помехоустойчивого энергосберегающего регулятора в системе TRACEMODE / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Вып. 15. – С. 162 – 166.

35. **Расширенный** анализ задач оптимального управления [Электронный ресурс] / С. В. Артемова, А. Н. Грибков, А. Е. Ерышов, М. А. Артемова // Информационные процессы и управление. – 2006. – № 1. – С. 2 – 10. – Режим доступа: www.tstu.ru/ipu/2006-1/002.pdf

36. **Орлова, Л. П.** Экспертная система энергосберегающего управления динамическими объектами / Л. П. Орлова, С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев // Повышение эффективности средств обработки информации на базе машинного моделирования : сб. тез. IV Всерос. конф. – Тамбов : ТВВАИУ, 1995. – С. 243–244.

37. **Артемова, С. В.** Энергосберегающее управление процессами нагрева оборудования / С. В. Артемова, А. Ю. Сенкевич, С. Б. Ушанев // Повышение эффективности средств обработки информации на базе машинного моделирования : материалы V Всерос. конф. – Тамбов : ТВВАИУ, 1997. – С. 243–244.

38. **Артемова, С. В.** Энергосберегающее управление процессами нагрева электропечей / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев, А. В. Неретин // Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Москва–Сочи, 1998. – С. 9 – 11.

39. **Артемова, С. В.** Аппроксимация нелинейных объектов динамическими сплайнами / С. В. Артемова // Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий : материалы междунар. науч.-техн. конф. и Рос. шк. молод. ученых и специалистов. – Москва–Сочи, 1999. – С. 104.

40. **Муромцев, Ю. Л.** Энергосберегающее управление в условиях помех / Ю. Л. Муромцев, С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Энергосбережение – теория и практика : материалы Первой Всерос. шк.-семинара. – Москва : Изд-во МЭИ, 2002. – С. 49 – 53.

41. **Артемова, С. В.** Информационная технология синтеза оптимальных регуляторов с учетом возмущающих воздействий и ошибок измерения / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев, А. Н. Грибков // Актуальные проблемы информатики и информационных технологий : материалы I Рос. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – С. 9 – 11.

42. **Артемова, С. В.** Программа поддержки принятия решений, созданная с использованием CASE-технологии / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // VIII науч. конф. ПГТУ : сб. тез. и докл. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – С. 116–117.

43. **Артемова, С. В.** Информационная технология проектирования энергосберегающих помехоустойчивых регуляторов / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев, А. Н. Грибков // VIII науч. конф. ПГТУ : сб. тез. и докл. – Тамбов : Изд-во гос. техн. ун-та, 2003. – С. 117–118.

44. **Артемов, А. А.** К вопросу существования решения задачи энергосберегающего управления в условиях помех / А. А. Артемов С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Вестник Тамбовского государственного университета : материалы Междунар. конф. «Общие проблемы управления и их приложения. Проблемы преподавания математики (ОПУ–2003)». – Тамбов, 2003. – Т. 8, вып. 3. – С. 341–342.

45. **Артемова, С. В.** Алгоритмы мягкой и жесткой коррекции энергосберегающего управления динамическими объектами при наличии помех / С. В. Артемова, А. Н. Грибков, А. А. Артемов // Актуальные проблемы информатики и информационных технологий : материалы II Всерос. (VII Тамбовская межвуз.) науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. ун-та им. Г. Р. Державина, 2003. – С. 8–9.

46. **Артемова, С. В.** К вопросу повышения качества функционирования системы энергосберегающего управления в условиях помех / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством продукции : материалы Общерос. шк.-семинара молод. ученых. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – С. 91 – 93.

47. **Артемова, С. В.** Модель динамических режимов многосекционной сушильной установки и ее реализация в системе энергосберегающего управления / С. В. Артемова, А. Н. Грибков, А. Е. Ерышов // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством : материалы Междунар. теплофиз. шк. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – Ч. 2. – С. 144 – 147.

48. **Артемова, С. В.** Мониторинг влажности пастообразных материалов с применением интеллектуального датчика / С. В. Артемова, П. А. Подхвятилин // Materialy mezinarodni vedecko-prakticka conference «Vznikmoderni vedecke-2012» Dil 18 Technicke vedy / Moderni informacni technologie. – Praga : Publishing House «Education and Science». – С. 98 – 101.

49. **Артемова, С. В.** Интеллектуальная система управления тепло-технологическими аппаратами / С. В. Артемова, П. А. Подхвятилин // Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki – 2013» Vol. 30. Techniczne nauki. Budownictwo i architektura. – Przemysł : Nauka i studia. – 2013. – С. 73 – 75.

Патенты:

50. **Пат. 242774 Российская Федерация, МПК F26B17/04, F26B25/22.** Способ сушки пастообразных материалов в вальцеленточной сушилке с изменением скорости движения пластинчатого конвейера [Текст] / Артемова С. В., Грибков А. Н., Брянкин К. В., Ерышев А. Е., Назаров А. С. ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2010109110/06(012760) ; заявл. 11.03.2010 ; опубли. 27.08.11. Бюл. № 7. – 15 с.

51. **Пат. 2444725 Российская Федерация, МПК G01N2500.** Способ оценки влажности пастообразного материала в процессе его сушки в вальце-ленточной сушильной установке [Текст] / Артемова С. В., Грибков А. Н., Брянкин К. В., Назаров А. С. ; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2010109120/28(012771) ; заявл. 10.03.2010 ; опубли. 10.03.12. Бюл. № 7. – 16 с.

Подписано в печать 09.06.2014
Формат 60 × 84/16. 1,86 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 289
Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел./факс (4752) 63-81-08, 63-81-33. E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru