Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

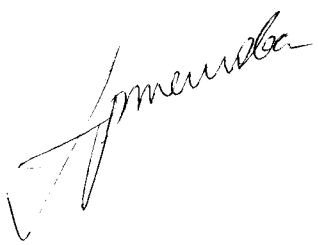
На правах рукописи

АРТЕМОВА СВЕТЛАНА ВАЛЕРЬЕВНА

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени доктора технических наук



Тамбов 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..……...……... 7
1 ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ И ПРОБЛЕМЫ ИХ ПОСТРОЕНИЯ ….……...……... 26
1.1 Информационно-измерительные и управляющие системы энергоемкими объектами ……..…….. 26
1.2 Тепло-технологические аппараты как объекты оптимального управления…… 33
1.2.1 Основные особенности тепло-технологических аппаратов…. 33
1.2.2 Способы и средства измерения …… 49
1.2.3 Задачи оптимального управления……. 55
1.3 Дестабилизирующие факторы в каналах управления и измерения…….. 60
1.3.1 Анализ и классификация дестабилизирующих факторов.. 60
1.3.2 Модели временных рядов для прогнозирования случайных величин …….……...…….. 62
1.3.3 Оптимальная фильтрация случайных сигналов ...……... 63
1.4 Стратегии и методы решения задач, используемых в информационных системах с искусственным интеллектом …..…….…… 68
1.4.1 Интеллектуальные и интеллектуализированные информационные системы ……...…….. 68
1.4.2 Общая характеристика моделей представления знаний и решений неформализованных задач …….. 71
1.5 Проблемы и подходы к решению задач синтеза в процессе разработки информационных систем …….…… 76
1.6 Цель и постановка задачи исследования ……. 86

2 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ ……..……. 90

2.1 Методы и алгоритмы построения системы ….…… 90

2.2 Этапы методологии построения системы …….. 95

2.3 Технологии построения системы …… 97

2.4 Задачи управления, решаемые на множестве состояний функционирования тепло-технологических аппаратов 101

2.5 Задача робастного управления динамическими режимами ..……. 107

2.6 Информационная модель предметной области …….. 110

2.7 Постановка задачи построения системы на этапе технического проектирования ……...…… 119

2.8 Интегрированный граф метода алгоритмизации синтеза решения задач управления режимами тепло-технологических аппаратов, использующий фреймы знаний ……..……...…… 123

Выводы по второй главе ……. 129

3 МОДЕЛИ И ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ ……...… 131

3.1 Идентификация математических моделей процессов режима «Пуск» на множестве состояний функционирования …..…… 131

3.2 Идентификация модели процесса нагрева многокамерного объекта управления ……..……. 143

3.3 Используемые модели динамики разгона электродвигателей ….. 145

3.4 Задачи управления режимом «Процесс» на примере вальцеленточных сушильных установок ……...……. 146

3.5 Идентификация модели оценки влажности пастообразного материала в процессе его сушки в вальцеленточной сушильной установке ……..…… 155

3.6 Определение меры доверия к качеству материала на выходе вальцеленточной сушильной установки ……... 162
3.7 Информационная модель интеллектуальной информационно-управляющей системы тепло-технологическими аппаратами …… 166
3.8 Задача структурного построения программного обеспечения интеллектуального датчика влажности движущегося пастообразного материала в вальцеленточной сушильной установке…….……... 172
Выводы по третьей главе …… 179

4 АНАЛИЗ И СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МНОЖЕСТВЕ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ …….. 181
4.1 Полный анализ энерго- или ресурсосберегающего управления в режиме «Пуск» на множестве состояний функционирования …… 181
4.2 Расширенный анализ оптимального управления при наличии дестабилизирующих факторов в режиме «Пуск» на множестве состояний функционирования ……....…….. 195
4.3 Интеллектуальный синтез управляющих воздействий в режиме «Пуск» на множестве состояний функционирования …… 204
4.4 Анализ и интеллектуальный синтез управляющих воздействий в режиме «Процесс» на множестве состояний функционирования ….. 206
Выводы по четвертой главе ……..….. 212

5 АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ……..……...…….. 214
5.1 Алгоритм синтеза оптимальной программы управления при использовании многозонных моделей в режиме «Пуск» ……...…..… 214
5.2 Алгоритмы и методы синтеза управляющих воздействий с учетом дестабилизирующих факторов в режиме «Пуск» …….. 220
5.2.1 Алгоритм позиционного энергосберегающего управления 220

5.2.2 Алгоритм синтеза управляющих воздействий с прогнозирующей моделью …….. 227
5.2.3 Алгоритм оптимального управления с фильтром Калмана 231
5.2.4 Метод настройки адаптивного регулятора с применением нечеткой логики …… 238
5.3 Комбинированный алгоритм управления процессом нагрева многокамерного тепло-технологического аппарата ……. 243
5.4 Алгоритмы решения задач управления в режиме «Процесс» ….. 244
5.5 Метод оценки влажности движущегося пастообразного материала и методика построения интеллектуального датчика влажности, лежащего в его основе ……. 255
5.6 Адаптивный алгоритм функционирования интеллектуального датчика влажности ……..…. 264
Выводы по пятой главе ……... 270

6 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ …….. 271
6.1. Особенности математического и программного обеспечения .. 271
6.2 Информационное и интеллектуальное обеспечение …… 278
6.2.1 База данных …….. 278
6.2.2 База знаний ……... 280
6.3 Функционирование системы на примере интеллектуальной информационно-управляющей системы вальцеленточными сушильными установками …… 288
6.4 Особенности технического обеспечения и техническая реализация интеллектуального датчика влажности ……... 291
6.5 Метрологический анализ системы ……. 298
Выводы по шестой главе……... 307

7 ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ ……... 309

7.1 Примеры синтеза управляющих воздействий в режиме «Пуск» вальцеленточных сушильных установок ……..…… 309

7.2 Примеры синтеза управляющих воздействий в режиме «Процесс» вальцеленточных сушильных установок …..……. 317

7.3 Примеры синтеза энергосберегающего управления в режиме «Пуск» установки отжига магнитопроводов …… 324

Выводы по седьмой главе ……. 340

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ……... 342

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ …….. 345

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ……... 354

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Доказательство лемм 4.1, 4.3, 4.4, 4.5 …….. 382

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Экспериментальные данные и результаты решения задач анализа и синтеза управляющих воздействий в режиме «Пуск» вальцеленточной сушильной установки ……... 385

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Данные для обучения нейронных сетей ……... 394

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Массив параметров аналитической модели оценки влажности пастообразного материала ……..……..… 404

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Техническое описание установки отжига магнитопроводов (ТОМ-1) ……..... 411

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Технические средства реализации интеллектуальной информационно-управляющей системы вальцеленточными сушильными установками …….……..……..……. 415

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Акты внедрения и справки о практическом использовании результатов работы ……... 417

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетов научно-технического прогресса на современном этапе во всем мире стала проблема энерго- и ресурсопотребления. По данным Европейской комиссии уровень полезного использования энергоресурсов составляет лишь 40%, для полезного конечного использования топлива – менее 20% [220]. В тоже время в мире быстро сокращаются запасы высокоэнергетического сырья, и растет стоимость производства энергии.

Низкая конкурентоспособность большинства отечественной продукции связана как с постоянным удорожанием энергоносителей, так и с неэффективным использованием топливно-энергетических ресурсов. В ряде отраслей доля затрат топливно-энергетических ресурсов колеблется от 15% до 40% себестоимости производимой продукции (без учета стоимости сырья и материалов), а в отдельных случаях она достигает 75%. Преобразование энергии в различных установках происходит с достаточно низким кпд (8-10% в подвижных и 25-30% в стационарных установках). В результате большое количество тепла идёт на подогрев воздуха, воды и почвы [218]. Известно, что экономии топливно-энергетических ресурсов можно добиться либо повышением кпд энергоустановки, либо за счет энергосбережения.

Важно учитывать, что энергоемкость (Вт/кг) процессов зависит от их производительности. При падении производительности энергоемкость повышается, что приводит к потерям энергии. Однако при повышении производительности может снижаться качество производимой продукции соответственно ее конкурентоспособность. Поэтому в энергоемких отраслях промышленности остро стоят вопросы модернизации производственных процессов и управления ими по качественным и энергетическим показателям.

К наиболее энергоемким объектам управления (рис. 1) в металлургии, машиностроении, пищевой, легкой, химической, лесоперерабатывающей, строительной промышленности, а также сельском, жилищно-коммунальном хозяйстве, авто- и авиастроении относятся тепло-технологические аппараты

(ТТА), представляющие собой одно- или многокамерные устройства, в пределах которых осуществляются все стадии тепло-технологического процесса [218]. Среди ТТА можно выделить четыре класса энергоемких объектов это: печи; сушильные установки; холодильные установки и котельные установки.

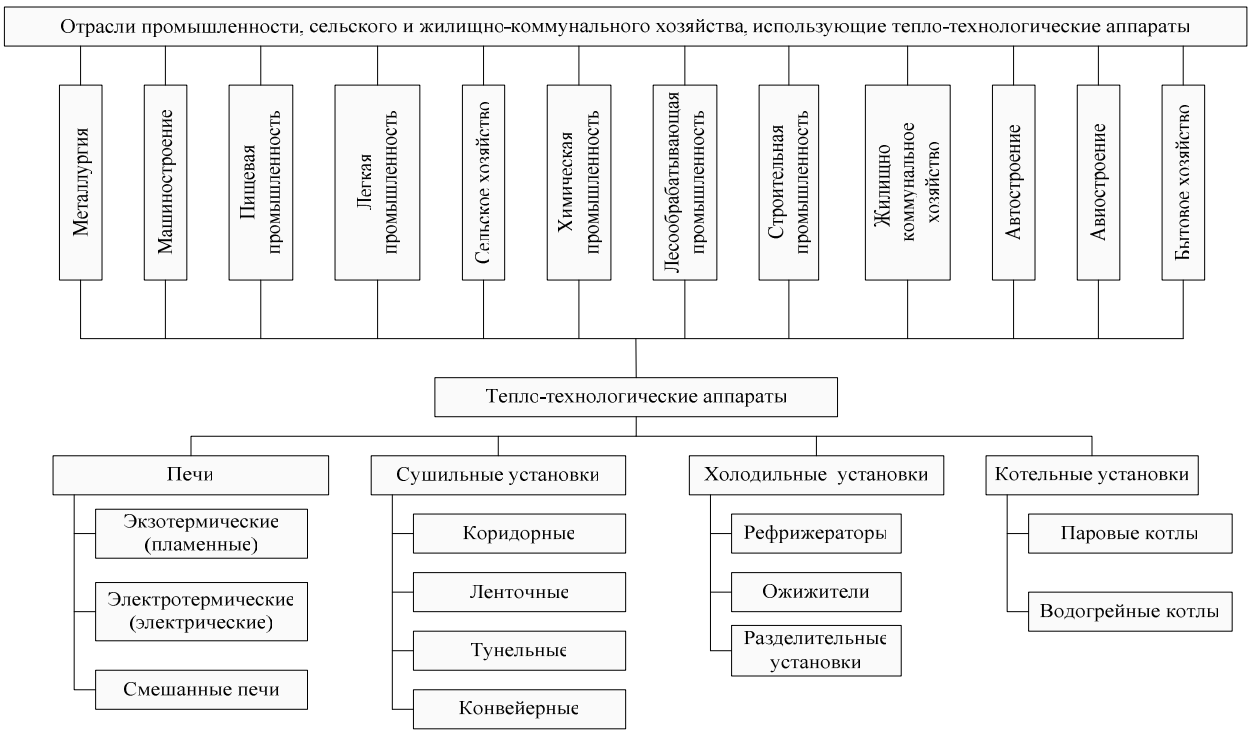


Рисунок 1. Область применения методологии построения интеллектуальных информационно-управляющих систем тепло-технологическими аппаратами

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 действующих в каналах управления и измерения дестабилизирующих факторов (ДФ); наличие таких изменений технологических режимов для которых невозможен пересчет их параметров в реальном 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. Одним из подходов повышения эффективности функционирования ТТА является разработка и внедрение в рамках модернизации автоматизированных производственных процессов в различных отраслях промышленности интеллектуальной информационно-управляющей системы (ИИУС), позволяющей оперативно вырабатывать управляющие воздействия, минимизирующие энерго- или ресурсопотребление в динамических режимах и минимизирующие потери качества и производительности тепло-технологических процессов. Под ИИУС будем понимать совокупность технических, 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.

Актуальность темы исследования. Следует отметить, что управление энергоемкими объектами имеет ряд особенностей. Требуется проведение исследовательских работ, после выполнения которых можно применять имеющиеся пакеты SCADA-систем и использовать CALS-технологии. Многие SCADA-системы, используемые как в России, так и за рубежом, позволяют решать проблемы автоматизированного создания необходимого программного обеспечения для информационно-управляющих систем, однако в описаниях этих систем нет сведений о методах и алгоритмах, позволяющих в реальном масштабе времени синтезировать энерго- и ресурсо- сберегающее управление. На основе анализа рекламных проспектов ведущих производителей средств промышленной автоматизации, наиболее близких по функциональным возможностям, можно выделить контроллеры, решающие задачи максимального быстродействия, оптимальной фильтрации и использования нечеткой логики. Во всех проспектах

отсутствует информация о том, что контроллеры могут в реальном времени синтезировать энергосберегающее управляющее воздействие.

Особенностью разрабатываемой ИИУС ТТА является возможность управления не только по критерию энергосбережения, но и по критериям, учитывающим качество производимого продукта и производительность управляемого процесса. Перечисленные требования оказывают противоречивые воздействия на задачу управления. Одновременное их использование существенно усложняет математическое и методологическое обеспечение проектируемой системы управления, а также ее техническую реализацию. Преимущество предлагаемых в работе подходов, таких как использование моделей, описанных на МСФ, применение метода синтезирующих переменных и методов искусственного интеллекта, заключается в том, что они позволяют решать задачи управления подобными объектами в реальном масштабе времени.

На этапе проектирования ИИУС ТТА при разработке математического и алгоритмического аппарата анализа и синтеза оптимального управления возникают значительные трудности вследствие плохо формализуемых тепло-технологических процессов. Это приводит к необходимости использования методов искусственного интеллекта. Как недостаточная теоретическая подготовка пользователей, так и недостаточное использование знаний и опыта экспертов в рассматриваемой предметной области требуют интеллектуализации разрабатываемой системы при реальной ее эксплуатации. Поэтому, развитие методологии проектирования ИИУС, инвариантной различным объектам управления и позволяющей с учетом особенностей этих объектов, оперативно синтезировать и реализовывать в реальном масштабе времени оптимальное управление режимами ТТА, является актуальной задачей.

Применение подобных систем в промышленности позволит сократить энерго- и ресурсопотребление на 10-30%, продлить 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 исполнение следующих этапов: анализ предметной области, постановка задач, моделирование, анализ задач управления и синтез параметров управления, алгоритмизация, *впервые 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 продукционным 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 синтеза 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 «Пуск» снизить ресурсопотребление на 5-10%. Использование полученных алгоритмов при управлении установкой отжига магнитопроводов в режиме «Пуск» позволило снизить затраты энергоресурсов на 5-15% без ухудшения качества выпускаемой продукции.

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 состояний 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 результаты работы представлялись и обсуждались на следующих 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» (Пржимисл, Чехия, 2013).

Созданные методы, алгоритмы, программы и результаты исследовательской работы приняты к внедрению: на АСО «ЭЛТРА» завод низковольтной аппаратуры (г. Рассказово, 1998); ОА 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. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка используемых источников и приложений. Основная часть работы изложена на 344 страницах, содержит 55 рисунков и 30 таблиц. Список литературы включает 288 позиций.

В первой главе рассматриваются возможности существующих информационно-измерительных и управляющих систем энергоемких объектов, особенности тепло-технологических аппаратов как объектов оптимального управления и минимизируемые функционалы, способы и средства измерения влажности материала. Приводится формулировка задачи оптимального управления для модели динамики представленной в виде системы дифференциальных уравнений; анализ и классификация дестабилизирующих факторов, действующих по каналам управления и измерения, а также модели временных рядов и фильтрации. Рассматриваются проблемы синтеза проектных решений информационно-измерительных и управляющих систем, стратегии и методы решения задач с использованием технологий искусственного интеллекта. Приводится созданная концептуальная модель предметной области.

Во второй главе сформулированы и обоснованы методологические основы синтеза интеллектуализированных оптимальных информационно-управляющих систем. Определены этапы методологии и сформулированы задачи

построения ИИУС ТТА. Проведена декомпозиция структурного построения ИИУС ТТА на стадии проектирования. Формализованы и сформулированы задачи оптимального управления, решаемые ИИУС ТТА на МСФ в том числе задача робастного управления и задача при наличии ДФ в каналах управления и измерения. Создана информационная модель предметной области, лежащая в основе разрабатываемых баз данных и знаний ИИУС ТТА. Сформулирована задача структурного построения ИИУС ТТА на этапе технического проектирования с использованием технологических критериев и ограничений. Разработан интегрированный граф технологии алгоритмизации синтеза управляющих воздействий. В пространстве состояний вершины графа соответствуют этапам решения задач и представляют собой фреймы знаний, оперирование которыми реализуется с использованием алгоритмов программных модулей. Ребра графа – это информация, передаваемая и получаемая в результате работы модулей. Вершины графа располагаются на различных уровнях абстракции – стратах. Каждый уровень характеризуется рядом особенностей, с помощью которых описывается поведение системы. Введение страт позволяет выделить типовые этапы решения задач синтеза управления, и за счет рассмотрения лишь альтернативных путей найти более оптимальные алгоритмы поиска решений на графе пространства состояний. Разработана технология алгоритмизации синтеза управляющих воздействий на основе созданного интегрированного графа, которая позволит оперативно синтезировать решение задач управления без участия лица, принимающего решение. Поэтому разрабатываемую информационно-управляющую систему, в основе работы которой лежит эта технология, будем называть, интеллектуальной информационно-управляющей системой

В третьей главе проведен анализ состояния вопросов математического моделирования, представляющего объект на множестве состояний функционирования (МСФ), и решения задач энерго- ресурсосберегающего оптимального управления процессами нагрева в ТТА. Разработан алгоритм идентификации моделей динамики объектов составляющих ТТА. Основным

критерием выбора подходящей модели берется минимум максимального значения абсолютной погрешности модели. Идентифицирована математическая модель процесса «Пуск» многокамерной СВЛ с учетом множества состояний функционирования. Она не содержит коэффициентов полученных опытным путем и позволяет учесть действие дестабилизирующих факторов со стороны соседних камер. В результате данная модель является пригодной для алгоритмизации синтеза управляющих воздействий минимизирующих ресурсо–потребление в реальном масштабе времени. Приведены постановки задач управления режимом «Процесс» в вальцеленточной сушильной установки, позволяющие минимизировать потери качества производимого материала и производительности процесса его сушки. Получены модели оценки влажности материала в контролируемых камерах СВЛ, основанные на нейронных сетях, пригодные для выработки управляющих воздействий в реальном масштабе времени. Использование этих моделей в ИИУС СВЛ позволяет снижать потери качества выпускаемого материала. Относительная погрешность оценки влажности пастообразного материала по моделям не превышает 2%. Модели отличаются от существующих определением влажности движущегося пастообразного материала в различных точках по длине сушильной установки. Они учитывают изменения управляющих и возмущающих воздействий. Предложен алгоритм, основанный на методе Демпстера-Шафера, для определения на основании экспертных оценок мер доверия к требуемой влажности материала на выходе СВЛ в зависимости от диапазонов значений влажности материала в n-ой и $(n+1)$-ой контролируемых камерах. Разработана методика решения задачи построения информационной модели ИИУС ТТА. Определен состав и взаимодействие типовых программных функциональных модулей ИИУПС и ИИПС инвариантных различным ТТА. Типизация требуется для оперативного построения рабочих прототипов ИИУС ТТА. Решена задача структурного построения программного обеспечения интеллектуального датчика влажности с использованием генетического алгоритма на основании сформулированных критериев и ограничений.

В четвертой главе проведен полный анализ энерго- или ресурсосберегающего управления на множестве состояний функционирования для инерционного объекта первого порядка для режима «Пуск». Сформулированы и доказаны леммы об анализе и синтезе энерго- и ресурсосберегающего управления динамическими режимами объектов, составляющих ТТА, на МСФ при функционалах вида затраты энергии, расход топлива. Предложена концепция и проведен расширенный анализ с учетом ДФ режима «Пуск». Наличие дестабилизирующих факторов по каналу управления приводит к тому, что внешние границы области существования решения ЗОУ превращаются в «коридоры» некоторой ширины, зависящей от интенсивности помехи. Существование решения при наличии помехи зависит от места расположения точки (A,L) в области на синтезирующей плоскости. Разработаны расширенные стратегии энерго- и ресурсосберегающего управления с учетом наличия дестабилизирующих факторов в каналах управления и измерения режима «Пуск». Отношение сигнала к шуму в ИИУС ТТА определяет выбор стратегии управления. Когда интенсивность шума мала, используют программную стратегию управления. Иначе, применяют позиционную стратегию. Разработана методика интеллектуального синтеза управляющего воздействия на МСФ режима «Пуск» при реальной эксплуатации ИИУС ТТА без лица принимающего решение. Проведен анализ и интеллектуальный синтез управляющих воздействий режима «Процесс» на МСФ. Применительно к решаемым задачам управления введено понятие состояния функционирования для многосекционной сушильной установки, и определены множества ситуаций, характеризующих различные состояния ТТА. Определены классы ситуаций, соответствующие различным алгоритмам управления, на множестве состояний функционирования.

В пятой главе сформулированы и доказаны леммы для систем переменной структуры о моментах переключения между стадиями. На основании, которых разработан алгоритм синтеза оптимальной программы управления при использовании многозонных моделей режима «Пуск». Созданы алгоритмы

оперативного интеллектуального синтеза энергосберегающих управляющих воздействий, позволяющие снизить негативное влияние ДФ в каналах управления и измерения. Предложен метод настройки адаптивного регулятора с применением нечеткой логики. Разработаны алгоритмы мягкой и жесткой коррекции при управлении с адаптивной стратегией. Созданы алгоритмы управления процессом сушки, обеспечивающие необходимое качество конечной продукции с максимально возможной производительностью, и синтезирующие управляющие воздействия в реальном масштабе времени при помощи нечеткого вывода на основе выбранной системы продукционных правил. Разработан интеллектуальный датчик влажности, основанный на нейронных сетях, обучение которых организовано по образцовым мерам в адаптивном диапазоне контролируемых камер с фиксированной точностью, и методика построения интеллектуальных датчиков влажности. Разработан метод оценки влажности пастообразного материала, базирующийся на адаптивном алгоритме функционирования, в результате работы которого интеллектуальный датчик представляет собой отказоустойчивую систему.

В шестой главе разработано математическое обеспечение режимов «Пуск» и «Процесс», лежащее в основе функционирования базы знаний ИИУС ТТА. 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. Создано программное обеспечение ИИУС ТТА в основе, которого лежит объектно-ориентированный подход одним из его преимуществ является возможность разработать компоненты один раз и многократно их использовать, что позволяет оперативно осуществлять построение рабочих прототипов ИИУС различных ТТА на базе исследовательского прототипа. Создана методика стыковки составляющих частей

многозонных моделей основанная на комбинации принципа максимума с принципом динамического программирования. Разработаны базы данных и знаний процессов «Пуск» и «Процесс» рабочего прототипа ИИУС СВЛ. Созданы информационно-управляющая и информационно-измерительная подсистемы ИИУС СВЛ. Построен на базе интегрированного графа интеллектуализации синтеза решения задач оптимального управления исследовательского прототипа ИИУС ТТА интегрированный граф ИИУС СВЛ. Создана техническая реализация интеллектуального датчика влажности. Определены: максимальная систематическая погрешность интеллектуального датчика влажности, которая составляет ±10,8%, и полная погрешность прямого эксперимента ±6,8%.

В седьмой главе получены аналитические модели в режиме «Пуск» технологического оборудования вальцеленточной сушильной установки – СВЛ, а также синтезированы управляющие воздействия, минимизирующие энерго- и ресурсопотребление на 5-10%. Приведено решение задач синтеза управляющих воздействий в режиме «Процесс» в вальцеленточной сушильной установки с применением метода изменения скорости пластинчатого конвейера, синтезированы управляющие воздействия позволяющие увеличить вероятность выхода качественной продукции до 0,98 и повысить производительность на 5%. Получены аналитические модели динамики переменной структуры для разогрева и догрева в режиме «Пуск» технологической установки отжига магнитопроводов – ТОМ с абсолютной погрешностью не превышающей 2^0 С. Решены задачи оптимального управления и синтезированы управляющие воздействия. Приведенные программы управления позволяют снизить энерго- затраты на 5-15%. Применение созданной ИИУС ТОМ-1 наряду с экономичным использованием энергии позволяет продлить срок службы карбид - кремниевых нагревателей, т.к. программы оптимального управления энергосберегающего оптимального управления дают возможность плавно повышать напряжение питания.

В диссертации обобщены результаты исследований, выполненных автором с 1991 по 2013 годы за время работы в Тамбовском государственном техническом университете.

Автор выражает глубокую благодарность своему, безвременно ушедшему, научному консультанту, заслуженному деятелю науки и техники РФ, доктору технических наук, профессору Муромцеву Ю.Л. за внимание к работе, заинтересованное и плодотворное обсуждение исследования.

1 ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ И ПРОБЛЕМЫ ИХ ПОСТРОЕНИЯ

В целях повышения эффективности в энергоемких отраслях промышленности в рамках модернизации производственных процессов и управления ими по энергетическим и качественным показателям на современном этапе развития промышленного производства широко внедряются информационно-измерительные и управляющие системы.

1.1 Информационно-измерительные и управляющие системы энергоемкими объектами

Под информационной системой (ИС) будем понимать упорядоченную организационно и взаимосвязанную совокупность программно-технических средств и методов, использующих современные информационные технологии, и применяемых для сбора, обработки, хранения, отображения и передачи информации в целях решения поставленных задач [72, 83]. Федеральный закон Российской Федерации от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» даёт следующее определение: «информационная система – совокупность содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих ее обработку информационных технологий и технических средств».

Информационная система в такой трактовке применяет в качестве основных технических средств переработки информации электронно-вычислительные машины (ЭВМ) и средства связи, позволяющие реализовать различные информационные процессы и вывод информации, необходимой при

принятии решений в задачах любой сложности и для различных предметных областей [248].

Информационная система представляет собой особую среду, включающую совокупность используемых компьютеров, локальных и глобальных компьютерных сетей связи, программных продуктов и инструментальных средств их разработки, баз данных, пользователей, других различных технических средств поддержки информационных технологий и т. д. Идеи создания информационных систем и основные принципы их организации появились задолго до возникновения электронно-вычислительных машин. Однако внедрение ЭВМ в различные сферы человеческой деятельности многократно повысило эффективность ИС и существенно расширило возможности их использования [108, 77, 111, 127, 157]. В рамках классификации ИС можно выделить два основных класса систем информационно-измерительные и информационно-управляющие системы.

Информационно-измерительная система (ИИС) представляет собой комплекс измерительного оборудования, устройств обработки и передачи данных, обеспечивающих автоматический сбор информации, измеренной количественно, непосредственно от исследуемых объектов, явлений, процессов – с помощью процедур измерения и контроля, анализа и обработки информации, а также отображения ее в виде числовых данных, высказываний, графиков, таблиц, диаграмм и др., отражающих состояния изучаемых объектов [258].

В соответствии с ГОСТ 8.437-81 [81] информационно-измерительная система – это «совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств, для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки в целях представления потребителю (в том числе для ввода в информационно-управляющую систему) в требуемом виде, либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации».

Под информационно-управляющей системой (ИУС) будем понимать определенную совокупность программно-аппаратного комплекса средств,

методов, алгоритмов автоматизации информационных процессов мониторинга и реализации управляющих воздействий различными объектами [82, 183].

Выделим следующие основные компоненты информационно-управляющей системы [1, 110]:

– человеческий фактор (аналитики, разработчики, программисты, пользователи, консультанты, инженеры, лаборанты, техники);

– инструментальные средства разработки программного обеспечения;

– системное и прикладное программное обеспечение;

– математическое и методологическое обеспечение;

– аппаратное обеспечение;

– информационные технологии.

Основным этапом разработки ИУС является создание программного обеспечения одним из следующих способов:

– использованием известных SCADA-систем (систем сбора данных и оперативного диспетчерского управления технологическими процессами) – готовых инструментальных средств создания систем автоматизации и управления технологическими процессами;

– использованием «традиционных» средств автоматизированного проектирования программного обеспечения таких, как CASE-технологии, CALS-средства, RAD-технологии и другие [183].

SCADA-система представляет собой набор различных инструментальных средств, модулей наблюдения за технологическим процессом и управления им [148]. Выделим основные функции SCADA-систем. Это:

1) сбор, накопление и первичная обработка информации о параметрах проводимого технологического процесса и состоянии используемого технологического оборудования;

2) отображение в виде графических мнемосхем информации о текущих параметрах технологического процесса на мониторах промышленных контроллеров;

3) построение графиков значений параметров технологического процесса в реальном масштабе времени;

4) выявление критических ситуаций, способных привести к различным авариям;

5) отображение на мониторах промышленных контроллеров различных технологических сообщений и о критических ситуациях;

6) накопление информации о параметрах технологического процесса;

7) управление технологическим процессом посредством человека-оператора;

8) вывод данных о протекании технологических процессов для дальнейшего использования их в управлении предприятием [148].

Большое количество известных SCADA-систем функционирует с использованием платформы MS Windows. Некоторые SCADA-системы такие, как RealFlex (www.realflex.ru) и Sitex (www.nautsilus.ru), реализованы на платформе QNX операционной системы реального времени [164]. Используемые в России SCADA-системы представлены в таблице 1.1 [222].

Исходя из предъявляемых к SCADA-системам требований, их функциональные возможности реализованы почти во всех программных пакетах [148]. Для создания автоматизированных АСУТП используется пакет Factory Suite A^2 фирмы Wonderware (www.wonderware.com), являющийся характерным примером SCADA-системы. Этот пакет включает такие составляющие, как [148]:

– InTouch – SCADA-система и визуализация данных;

– SuiteVoyager – комплексные информационные порталы предприятия;

– Industrial Application Server – сервер промышленных приложений;

– Industrial SQL Server – база данных;

– DT Analyst – контроль и учет простоя оборудования;

– QI Analyst – статистический контроль процессов;

– InTrack – оперативное диспетчерское управление производством;

– InBatch – управление дозированием и смешением;

– InControl – мониторинг процессов в реальном времени.

В теплоэнергетике, нефтегазовых отраслях, металлургии нашли применение информационно-управляющие системы на базе InTouch [148].

Одной их самых покупаемых в нашей стране SCADA-систем является система TraceMode (www.tracemode.ru). Она применяется в создании распределенных АСУТП различного назначения в энергетических, металлургических, нефтяных, газовых, химических отраслях промышленности. Система TraceMode по внедрению в РФ значительно опережает другие пакеты подобного класса [148].

Таблица 1.1

Наиболее распространенные SCADA-системы

SCADA-система	Фирма-изготовитель	Страна
InTouch	Wonderware	США
FIX	Intellution	США
Genesis	Iconics Co.	США
Citect	CI Technology	Австралия
Factory Link	United States Data Co.	США
RealFlex	BJ Software Systems	США
Sitex	Jade Software	Великобритания
WinCC	Siemens	Германия
Trace Mode	AdAstra	Россия
RTWin	SWD Real Time Systems	Россия
Simplicity	GE Fanuc Automation	США
RSView	Rockwell Automation Inc.	США
САРГОН	НВТ–Автоматика	Россия
MIK$Sys	МИФИ	Россия

Система TraceMode включает средства создания систем телемеханики и операторского интерфейса, цифрового управления технологическими процессами

с использованием программирования промышленных контроллеров (Softlogic), [148].

Кроме использования SCADA-систем, создать ИУС возможно за счет использования «инструментальных» средств CASE и CALS-технологий проектирования и разработки подобных систем. Эти технологии применяется для проектирования «наукоемких» ИУС, которые используют математическое и алгоритмическое обеспечение, включающее методы искусственного интеллекта и теорию оптимального управления [183].

Примерами CASE-средств служат следующие информационные технологии:

– BPwin (www.bpwin.ru) – средство визуального моделирования технологических процессов в нотациях моделирования: функционального (IDEF0), потоков данных (DFD) и потоков работ (IDEF3) [222];

– ERwin (www.erwin.ru) – среда построения информационных моделей ИУС в нотации ER-диаграммы (IDEF1x) и моделирования баз данных для различных СУБД [164, 165];

– Rational Rose – средство визуализации объектно-ориентированных систем в нотациях унифицированного языка моделирования (UML) [122];

– Delphi (www.borland.com) – инструментальное средство быстрой разработки объектно-ориентированного программного обеспечения ИУС и ее баз данных [246].

Мощным средством разработки математического и алгоритмического обеспечения ИУС является система автоматизации математических расчетов MATLAB (www.matlab.ru), использующая расширенное представление и применение матричных операций. Система расчетов MATLAB включает следующие пакеты анализа и синтеза управляющих систем [150]:

– Control System Toolbox, используемый при моделировании, анализе и проектировании различных (непрерывных и дискретных) систем автоматического управления. В этом пакете реализованы методы передаточных

функций, широко используемые в теории автоматического управления, и некоторые методы искусственного интеллекта;

– Nonlinear Control Design Toolbox, реализующий методы динамической оптимизации, моделирования Монте-Карло, подавления помех, слежения и др. Этот пакет прикладных программ предназначен для построения нелинейных систем управления и поддерживает проектирование систем как с одним входом и одним выходом (SISO), так и систем управления, описываемых многими входами и многими выходами (MIMO);

– Robust Control Toolbox, включающий средства проектирования и анализа устойчивых многопараметрических систем управления. Такие системы обладают модельными ошибками, динамика их известна не полностью, параметры могут меняться в процессе моделирования;

– Model Predicative Control Toolbox, содержащий целый набор средств реализации стратегии предикатного управления многоканальными процессами с некоторыми условиями, налагаемые на переменные состояния и управляющие воздействия;

– Quantitative Feedback Theory Toolbox, содержащий средства создания робастных систем управления с обратной связью;

– LMI Control Toolbox, обеспечивающий решение задач линейного программирования;

– System Identification Toolbox, включающий средства математического моделирования различных динамических систем, с использованием входных и выходных экспериментальных данных [150].

Заказчики, как правило, предъявляют жесткие требования к разработке систем управления, включающие способность обеспечить поддержку распределенных информационных ресурсов и функционирование в реальном масштабе времени в распределенной сетевой среде, а также возможность обеспечения многозадачных и многопользовательских режимов, при невысокой ее цене [132].

При проектировании ИУС в последнее время существенно возрастают темпы работ, унификация технических и программных средств увеличивается, растет количество SCADA-пакетов, повышается роль стандартизации проектирования, происходит постоянная смена поколений программно-технических комплексов, растет число внедряемых систем управления во все отрасли производства (особенно, в нефтехимической, нефтеперерабатывающей, газовой, металлургической промышленности и топливно-энергетическом комплексе) [132].

Заметим, что система управления процессами в энергоемких отраслях обладает рядом характерных особенностей, требующих организации и проведения исследований с целью обеспечения возможности применения готовых программных продуктов SCADA-систем и CALS-технологий. Известные SCADA-системы способны решать вопросы автоматизации процесса создания программного обеспечения для разрабатываемых систем управления. Однако, в технической документации к этим системам нет сведений о методах и алгоритмах, позволяющих в реальном масштабе времени синтезировать энерго- и ресурсо- сберегающее управление.

Создаваемые информационные системы управления энергоемкими объектами как раз должны обладать способностью к управлению по различным критериям, обеспечивающим энерго- и ресурсо- сбережение, а также высокую производительность технологического процесса без снижения качества выпускаемой продукции. Перечисленные требования оказывают противоречивые воздействия на задачу управления. Одновременное их использование существенно усложняет математическое и методологическое обеспечение проектируемой системы управления, а также ее техническую реализацию. Решение задач управления по комплексному критерию недостаточно рассмотрено в литературе, поэтому создание ИУС энергоемкими объектами по комплексным критериям является своевременной и актуальной задачей.

К объектам, для управления которыми требуется получить информацию о текущих параметрах технологических режимов, относятся тепло-

технологические аппараты (ТТА), представляющие собой одно- или многокамерные устройства, в пределах которых осуществляются все стадии данного тепло-технологического процесса [218].

1.2 Тепло-технологические аппараты как объекты оптимального управления

К наиболее энергоемким объектам управления в металлургии, машиностроении, пищевой, легкой, химической, лесоперерабатывающей, строительной промышленности, а также сельском, жилищно-коммунальном хозяйстве, авто- и авиастроении относятся ТТА. Можно выделить четыре основных класса ТТА – это печи, сушильные, холодильные и котельные установки.

1.2.1 Основные особенности тепло-технологических аппаратов

Как объекты оптимального управления ТТА имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при анализе и синтезе оптимального управления в интеллектуальной информационно-управляющей системе (ИИУС).

В качестве основных особенностей ТТА как объектов управления можно выделить следующие:

– существенное потребление топливных и энергетических ресурсов;

– строгое соблюдение технологических регламентов;

– учет влияния камер, составляющих ТТА, друг на друга;

– наличие дестабилизирующих факторов в каналах управления и измерения;

– изменение основных режимных параметров объекта управления в процессе его реальной эксплуатации.

Векторы управления и возмущения могут содержать следующие виды составляющих – компоненты общего действия (на весь ТТА) и частные (локальные) компоненты. В качестве выходных переменных могут рассматриваться контролируемые величины в отдельных частях ТТА. Управляющее устройство вырабатывает воздействия, которые учитывают возможные изменения состояний функционирования, обусловленные наличием временного лага между управляющими воздействиями и выходными переменными. Основными показателями эффективности функционирования ТТА являются качество выпускаемого продукта, производительность процесса, низкие энерго- и ресурсозатраты.

Исходя из задач управления, проведенный анализ особенностей функционирования ТТА позволяет определить группу составляющих ТТА объектов, к которой требуется применить ресурсо- или энерго- сберегающее управление. В эту группу входят:

1) объекты с значительным (более 5% от общей продолжительности работы) временем пребывания в динамических режимах;

2) объекты, динамика которых описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений;

3) объекты, динамика которых описывается системой дифференциальных уравнений с разрывной правой частью вариативной структуры [261];

4) объекты, для которых реализуемы синтезированные управляющие воздействия.

Особое внимание в данной диссертационной работе уделялось двум классам ТТА печам и сушильным установкам. Сушка – достаточно распространенный энергоемкий процесс, использующийся в таких отраслях промышленности, как химическая, металлургическая, строительная, пищевая, машиностроение и другие. М.В.Лыков определял сушку влажных материалов как “процесс, или, точнее, совокупность процессов переноса тепла и массы, сопровождающихся структурно-механическими, а в ряде случаев, и химическими изменениями высушиваемого вещества” [155]. Сушка определяет качество

производимой продукции, а также технико-экономические характеристики всего производства. Топливные и энергетические затраты большинства промышленных предприятий являются основными и сопоставимыми с общими сырьевыми затратами [229].

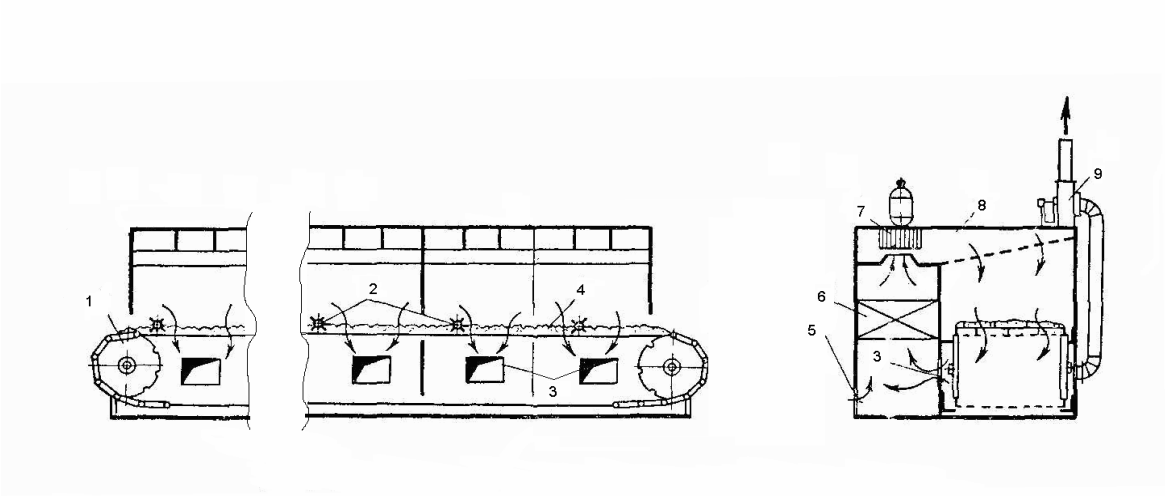


Рисунок 1.1 Многокамерная сушилка ленточного типа:
1 – лента пластинчатого конвейера; 2 – ворошители; 3 – рециркуляционные окна; 4 – высушиваемый материал; 5 – окно забора воздуха; 6 – паровой калорифер; 7 – циркуляционный вентилятор; 8 – распределительный воздушный канал; 9 – вытяжной вентилятор

В настоящее время в промышленном производстве применяются разные технологии сушки, основанные на различных физических принципах и законах. В соответствии с этим применяются различные конструкции сушильных установок [55]. Многообразие сушильных установок задается различными признаками. Исходя из принципов функционирования, сушильные установки бывают непрерывного и периодического действия; в зависимости от давления – атмосферными и вакуумными; по способу подвода тепла – контактными, конвективными, радиационными, комбинированными. Конвективные сушилки делятся, исходя из применяемого вида газового теплоносителя, на сушилки с нагретым воздухом, инертными газами, топочными газами, перегретыми парами воды и органических жидкостей. Можно также классифицировать сушильные установки по типу высушиваемого материала и по гидродинамическим условиям в камере [155].

В ряде отраслей промышленного производства технологические процессы

протекают в жидкой фазе, при этом конечные продукты имеют различный вид – крошки, зёрен, пасты, пыли. Сочетания обрабатываемого материала и его вида на выходе сушилки определяют применение соответствующих метода процесса сушки и типа сушильной установки.

В отечественном промышленном производстве широко применяются как конвективный, так и контактный методы сушки. В процессе конвективной сушки передача тепла осуществляется непосредственно от теплоносителя к высушиваемому материалу [155]. В качестве примера конвективной сушильной установки на рис. 1.1 изображены ленточная многокамерная сушильная установка (продольное и поперечное сечения). Конвективная сушка материала имеет ряд преимуществ [155]:

1) более "мягкие" условия протекания процесса;

2) сравнительно незначительные затраты энергии на единицу производимого продукта;

3) возможность реализации оптимальной кинетической кривой процесса сушки.

В процессе контактной сушки тепло высушиваемому материалу передается через разогретую перегородку, находящуюся в соприкосновении с материалом.

В зависимости от условий взаимодействия потока сушильного агента и материала сушильные установки можно разделить также на следующие подгруппы:

1. Сушильные установки с омыванием потоком газа спокойного слоя материала, причем для зернистых материалов сушильный агент проходит либо вдоль слоя материала, либо через него.

2. Сушильные установки с полувзвешенным или пульсирующим состоянием зернистого материала.

3. Распылительные и пневматические сушильные установки с сушкой дисперсных материалов во взвешенном состоянии [155].

Конвективные сушильные установки с омыванием могут быть следующих видов: туннельная (горизонтальная – транспортирование происходит в

вагонетках; вертикальная – транспортирование в подвесных люльках), камерная, петлевая, валковая, турбинная, ленточная, шахтная, с сопловым обдувом материалов. Исходя из свойств самого материала и требований к процессу сушки, используют однокамерные или многокамерные сушильные установки. В многокамерных сушилках разные камеры могут отвечать за различные физические процессы – сушки, увлажнения, прокаливания, охлаждения, при этом каждая камера может иметь собственный состав оборудования и функционировать с различными значениями температуры и влажности сушильного агента [155].

По способам движения материала и сушильного агента конвективные сушильные установки делятся на прямо- и противоточные, параллельного и смешанного тока. Сушильный агент может перемещаться поперечно или продольно (по оси), в соответствии с этим применяются центробежные, либо осевые вентиляторы [155].

Для конвективной сушки материала во взвешенном состоянии применяется пневмотранспорт, в полувзвешенном состоянии – кипящий слой. Это реализуется в таких сушильных установках, как барабанные, с кипящим слоем, аэрофонтанные, пневматические, вихревые, циклонные, распылительные камеры [155].

В отличие от конвективной при кондуктивной и радиационной сушках тепло передается материалу за счет теплопроводности или лучеиспускания с нагретой поверхности, здесь воздух (или газ) применяется лишь для отвода испаряющейся влаги.

Кондуктивные сушилки бывают тарельчатого, барабанного, трубчатого, вальцевого (для пастообразных и жидких веществ), шнекового (для сыпучих веществ), цилиндрического (для листовых материалов) типов [155].

Сушилки радиационного типа подразделяются в соответствии с видом использующегося излучателя и типом материала. Здесь излучателями могут выступать лампы (термоэлектрические излучатели) или передвижные керамические плиты с обогревом открытым пламенем от газовых горелок [155].

Для сушки дорогостоящих, окисляющихся на воздухе, термочувствительных материалов часто применяют вакуумные радиационно-кондуктивные сушильные установки [155].

Как было сказано выше, сушильные установки могут быть как периодического, так и непрерывного действия. В сушилках периодического действия значительное внимание следует обращать на динамический режим, который будем называть «Пуск». В сушилках непрерывного действия внимание останавливаем на режиме соблюдения требований технологического регламента, этот режим будем называть «Процесс».

К другому классу ТТА относятся промышленные [114] и бытовые печи, которые можно разбить по источнику получаемой энергии на три основных вида – топливные, электрические и смешанные [233].

Электрические печи широко распространены и очень разнообразны как по конструкции, так и по размерам. Их удобно классифицировать по способу превращения электрической энергии в тепловую, при этом можно выделить пять подклассов [233].

1. Электрические печи сопротивления, в которых электрическая энергия превращается в тепло в твердых или жидких телах при протекании через них тока [233].

2. Электрические дуговые печи, в которых электрическая энергия превращается в тепловую в дуговом разряде в газовой среде или в парах металла. Дуговые печи могут быть косвенного действия, когда разряд горит между специальными электродами, а тепло передается нагреваемым (расплавляемым) телам в основном лучеиспусканием, и прямого действия, когда одним из электродов (или нулевой точкой трехфазной системы) является само нагреваемое тело. К первой группе относятся однофазные печи качающегося типа для плавления цветных металлов, ко второй - сталеплавильные печи, наиболее мощные из дуговых агрегатов. К последним относятся и вакуумные дуговые печи (дуга в парах металла), используемые как для получения высококачественных сталей, так и высокоактивных жаростойких металлов и сплавов, таких как титан,

цирконий, молибден, вольфрам и т. п., которые интенсивно окисляются при нагреве. Особо выделяют плазменные установки, в которых дуга горит в струе газа. Нагретый высокоионизированный газ, представляющий собой низкотемпературную плазму, используется в свою очередь для нагрева (или плавления) металлов [233].

3. Дуговые печи сопротивления представляют собой промежуточный класс печей - в них горит дуга, но, в то же время, протекающий через шихту ток, благодаря большому ее сопротивлению, выделяет и в ней заметное джоулево тепло. Таким образом, эти печи являются и дуговыми печами прямого действия, и печами сопротивления прямого действия. Используются они для рудотермических процессов для восстановления металлов из руд и являются наиболее крупными, мощными печами [233].

4. Установки индукционного и диэлектрического нагрева, которые могут работать как на промышленной, так на повышенной и высоких частотах. При пропускании переменного тока через индуктор (соленоид) в нем возникает переменное магнитное поле, возбуждающее вихревые токи в помещенных в это поле электропроводящих телах, нагреваемых этими токами. Индукционные установки используются как для плавления (тигельные и канальные индукционные печи), так и для нагрева металлов перед ковкой, штамповкой и другими видами механической обработки (сквозной нагрев), для поверхностной закалки изделий, для непрерывного (последовательного) нагрева изделий, для термообработки или зонной плавки. При весьма высоких частотах возможен индукционный нагрев газовой плазмы - высокочастотный плазменный разряд. При диэлектрическом нагреве диэлектрики помещаются между обкладками конденсатора, питаемого от источника высокой частоты, и нагреваются в быстропеременном электрическом поле за счет диэлектрических потерь [233].

5. Электронно-лучевые установки, в которых нагрев осуществляется в высоком вакууме путем бомбардировки нагреваемых тел потоком электронов. Источником электронов может явиться металлический или газовый катоды, нагретые до высокой температуры, из которых электроны отсасываются и

направляются к нагреваемым телам электрическим полем. Эти установки могут быть с кольцевыми катодами (анодом является нагреваемое тело) или с радиальными, коаксиальными или магнетронными пушками с отдельными анодами. В электронных установках можно получить очень большие удельные мощности на поверхности нагреваемого тела и плавить тем самым тела с наибольшими температурами плавления [233].

Следует отметить, что тепловой КПД большинства установок низок, поэтому естественно внимание исследователей к глубокому анализу физической сущности процессов и методам их организации с целью изыскания способов повышения тепловой экономичности. Одним из методов снижения энерго- и ресурсопотребления является внедрение систем оптимального управления в рамках комплексной автоматизации производственных процессов в различных отраслях промышленности [95].

Большое количество измеряемых параметров процесса сушки и вычисляемых параметров управления, сложность критериев оптимальности, связанных с качественными, количественными и энергетическими показателями являются особенностями автоматизации процесса сушки. Эти особенности определяются спецификой различных свойств сушильных агрегатов как объектов управления. В частности, размещение датчиков в сушильных камерах должно учитывать распределенность параметров объекта управления [55]. Качество сушки определяется целым набором различных факторов – управляющих и возмущающих воздействий. Так для сушильной установки, изображенной на рис. 1.1, управляющими воздействиями служат: скорость движения ленты, степень открытия и закрытия воздухозаборных окон, включение и выключение вентиляторов; а в качестве возмущающих воздействий рассматриваются: начальная влажность материала, влажность воздуха, наличие или отсутствие ворошителя, давление и температура воздуха и т.д.

Известными способами снижения энергозатрат в промышленном производстве являются: а) повышение производительности тепло-технологического оборудования, уменьшение простоев; б) увеличение

надежности оборудования для нагрева; в) повышение качества теплоизоляции [178, 2, 11, 270, 131, 120, 259].

Снизить ресурсо- и энерго- потребление также можно за счет применения ресурсо- и энерго- сберегающего управления динамическими режимами на множестве состояний функционирования. Проведенные исследования, в результате которых получены алгоритмы синтеза оптимального управления (ОУ) обеспечивают снижение энергозатрат на 20% при имитационном моделировании и могут быть реализованы на базе простых и дешевых микропроцессорных устройств в реальном масштабе времени [180].

Решение проблем ресурсосберегающего управления основано на задании по используемому энергоносителю и режиму работы объекта управления соответствующего функционала, который требуется минимизировать. При этом с учетом особенностей действующих дестабилизирующих факторов осуществляется выбор соответствующей стратегии управления. Как правило ТТА являются объектами с распределенными параметрами [73, 100, 160, 161, 245], модели которых представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Это создает дополнительные сложности при синтезе оптимального управления в реальном масштабе времени [279]. Построение ИИУС основано на минимизации объема оперативной и постоянной памяти, при этом увеличение скорости синтеза управляющих воздействий для различных режимов ТТА достигается за счет использования простых, конечных формул.

При решении задач управления режимами ТТА используемые критерии должны отражать количественные, качественные и энергетические показатели [73, 64]. Для постановки задач оптимального управления необходимо иметь соответствующие математические модели, отражающие основные физико-химические особенности процессов, протекающих в ТТА [70, 121, 118, 147, 151, 230]. В результате математического моделирования следует получать как качественное, так и количественное описание процессов, протекающих в ТТА, и определять основные пути оптимизации управляемых процессов [154, 168, 194,

239]. Это описание должно адекватно отражать влияние изменений (в широком диапазоне) параметров модели на изучаемый процесс.

Сушильные установки – сложные ТТА, имеющие в своем составе оборудование для подачи тепла и оборудование, осуществляющее движение рабочих органов. К оборудованию для подачи тепла относятся: калориферы, газовые и топливные горелки, топки, циклонные топки, термоизлучатели, генераторные лампы, пневматические форсунки, холодильники и т.д. К оборудованию, осуществляющему движение рабочих органов, относятся механизмы, использующие электроприводы: турбины, валки, траспортеры, вентиляторы, вибропитатели, шнеки, дробилки, валы с билами, барабаны, циклоны, насосы и т.д. Сушильные установки могут использовать различные типы электродвигателей как постоянного, так и переменного токов. Применяемые электродвигатели постоянного тока могут подразделяться на электродвигатели с различными видами возбуждения: параллельное, последовательное, независимое, смешанное. Электродвигатели переменного тока делятся на электродвигатели синхронного типа, электродвигатели асинхронного типа с фазным ротором, электродвигатели асинхронного типа с короткозамкнутым ротором [237, 79, 263]. ТТА можно рассматривать как многомерный технологический объект, состоящий из совокупности объектов (элементов его оборудования), осуществляющих тепло-технологический процесс.

Оборудование ТТА может потреблять различные виды энергии. В режиме «Пуск» – динамическом режиме работы оборудования – от вида энергоносителя зависит вид минимизируемого функционала. Если используется электроэнергия, то в качестве функционала рассматривается минимум затрат энергии [52, 5, 200, 149, 254]

$$J_э = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t)dt. \qquad (1.1)$$

Если в качестве теплоагента используется водяной пар, спирт, бензин, керосин, солярка, газ, уголь и т.д., то в качестве функционала берется «расход топлива» [52, 5, 200, 149, 254]

$$J_{\text{т}} = \int_{t_0}^{t_k} |u(t)| dt, \qquad (1.2)$$

здесь $u(t)$ – управляющее воздействие; t_0, t_k – начальное и конечное значение временного интервала.

Наиболее эффективно применение ИИУС, если в качестве ТТА выступают энергоемкие объекты периодического действия, у которых теплоизоляция отсутствует, или они имеют недостаточную теплоизоляцию. Эксперименты показывают, что для таких ТТА экономия ресурсов при реализации синтезированных ИИУС управляющих воздействий может достигать от 15 до 30% (уменьшение функционала затрат) по сравнению с традиционным управлением [186].

В режиме «Процесс» непрерывно возрастают требования к качеству выпускаемой продукции и производительности тепло-технологического процесса, что приводит к необходимости минимизировать функционал

$$Q = Q(\Delta Qp, \Delta \Pr, \vec{u}) \to \min_{\vec{u}}, \qquad (1.3)$$

где $\Delta Qp, \Delta \Pr$ – потери, вызванные снижением качества конечной продукции и производительности тепло–технологического процесса, $\vec{u}$ – вектор управляющих воздействий [15].

При моделировании процессов, когда точное аналитическое решение дифференциального уравнения в частных производных невозможно, или, по крайней мере, затруднительно, используют так называемые эвристические методы – различные методы построения искусственных нейронных сетей [143, 174, 203]. Достоинство моделей, построенных на нейронных сетях, заключается в возможности получения приемлемой точности описания исследуемого процесса и применения в решении задач управления [63, 133].

В 1974 г. Мамдани показал возможность применения идей нечеткой логики для построения системы управления объектом. Нечеткое управление используется при недостаточном знании объекта управления, но при наличии опыта управления им, а также в нелинейных системах, идентификация которых

слишком трудоемка и в случаях, когда по условию задачи необходимо использовать знания эксперта. [98].

При управлении сложными объектами обычно приходится оперировать неполными знаниями об их истинности. В этой связи применяют понятие лингвистической переменной, которая задается набором словесных (вербальных) характеристик, являющихся значениями этой переменной [143, 150, 192, 217].

Для создания динамических моделей энергоемких объектов часто предполагают [53, 208] нормальное функционирование системы при решении задач идентификации. В настоящее время широко применяются в задачах анализа и синтеза многомерных динамических объектов математические модели, описываемые с учетом множества состояний функционирования (МСФ) [160, 161, 182, 185]. Эти модели дают возможность учесть как различные режимы работы объекта управления, так и влияния внешней среды, а также других действующих на объект факторов различной природы. В этой связи предлагается описывать процессы, происходящие в ТТА, моделями с учетом множества состояний функционирования.

Модель $\mathcal{M}$ на МСФ строится как расширение модели $\mathcal{M}$ динамической системы [73], определяемой пятеркой $(Z, X(\bullet), Y, \psi, \varsigma)$, где Z означает множество значений вектора фазовых координат, под Y понимается множество значений вектора выхода; множество траекторий $X(\bullet) = (X(t), t \in [t_0; t_k])$ вектора входа x при изменении на временном интервале $[t_0; t_k]$; операторы ψ, ς – переходная функция и выходное отображение, т.е. $\psi : T \times T \times Z \times X(\bullet) \to Z$, $\varsigma : T \times Z \to Y$; T – множество моментов времени t. Модель $\mathcal{M}$ не учитывает изменения операторов ψ, ς в процессе функционирования системы.

В ТТА выделяют два рода процессов. Процессы первого рода связаны с потоками сырья, продукции, информации; состояние системы относительно этих процессов определяется вектором z.

Процессы второго рода отражают изменения состояний работоспособности (отказы, ремонты), преднамеренных и непреднамеренных воздействий,

влияющих на структуру объекта и операторы ψ, ς. Состояние системы относительно процессов второго рода определяется значением переменной h. При изменении h в общем случае могут изменяться размерности векторов x, y, z и класс системы; например, в одних состояниях h – система линейная детерминированная, в других – нелинейная стохастическая [73].

В модели $\mathcal{M}$ дополнительно используется переменная h состояния функционирования и операторы γ, η. Значение h меняется, например, при нарушениях работоспособности составных частей системы, вызывающих изменение ее структуры, а следовательно, и операторов ψ, ς. Множество H возможных значений переменной h есть МСФ. Изменение h происходит в случайные моменты времени и задается оператором $\gamma : T \times H \to H$. Каждому значению $h \in H$ отображением η ставится в соответствие пара операторов $(\psi_h; \varsigma_h); \psi_h \in \Phi; \varsigma_h \in \vartheta$, т.е. $\eta : T \times H \to (\Phi, \vartheta)$. Таким образом, модель на МСФ определяется $(Z, X(\bullet), Y, H, \gamma, \eta, \Phi, \vartheta)$ [73].

В зависимости от возможности изменения и идентификации переменной h на рассматриваемом временном интервале управления $[t_0; t_k] = T$ выделяют четыре основных класса систем и их моделей на МСФ [184].

Если для каждого интервала времени T значение переменной h состояния функционирования известно и неизменно, то объект относится к первому классу. На интервале T объект первого класса задается упорядоченной парой операторов $(\psi_h; \varsigma_h)$. Для всех интервалов времени модель объекта первого класса задается множеством упорядоченных пар $\{(\psi_h; \varsigma_h), h \in H\}$. Итак, $\mathcal{M}_{\text{h}} \in \xi_1$ при

$$h(t) = \hat{h} = const.$$

Многие простые объекты, составляющие ТТА, работающие в различных технологических режимах, с различными материалами, разными условиями работы и т.д. относятся к первому классу. Изменения h в этих объектах происходят вне временного интервала управления $[t_0; t_k]$ [184].

Для объектов второго класса ξ_2, как и для первого, значение переменной h состояния функционирования на интервале T также неизменно, но при этом оно неизвестно, а известны лишь вероятности $P(h/T), h \in H$. Модель второго класса обозначим $\mathcal{M}_{\mathcal{H}}$. Вектор $z(t)$, $t \in [t_0; t_k]$ в модели $\mathcal{M}_{\mathcal{H}}$ имеет своими значениями случайные величины с распределением

$$P(H/T) = \{p(h/T), h \in H\}.$$

Примером моделей $\mathcal{M}_{\mathcal{H}}$ являются стохастические системы [184], модели $\mathcal{M}_{\mathcal{H}}$ схожи с дифференциальными включениями [10, 235, 103].

В системах третьего класса переменная h состояния функционирования изменяется на временном интервале $t \in [t_0; t_k]$, причем ее значение в каждый момент $t \in T$ известно (идентифицируется). Модель объекта третьего класса $\mathcal{M}_{h(\bullet)}$ описывается кусочно-постоянной траекторией изменения значений упорядоченной пары операторов $(\psi_h; \varsigma_h)$; причем переключения происходят в случайные моменты $t_i \in T$, $i = \overline{1, \ell}$, число которых равно ℓ; эти моменты соответствуют изменениям значений переменной h. Таким образом,

$$\mathcal{M}_{h(\bullet)} \in \xi_3 : \forall T \in T \times T, \ \forall s \in [t_0, t_k], \ h(s) = \hat{h}(s).$$

Примерами моделей $\mathcal{M}_{h(\bullet)}$ являются модели, описываемые уравнением Каратеодори, дифференциальным уравнением с разрывной правой частью [252], в частности, с программируемыми моментами переключения $t_i \in T$, $i = \overline{1, \ell}$ [50]. К объектам третьего класса относятся многие объекты, для которых задачи управления решаются при больших разностях между конечными и начальными значениями вектора фазовых координат

$$\Delta z_i = z_i(t_k) - z_i(t_0), \ i = \overline{1, n}.$$

или при длительных временных интервалах $[t_0; t_k]$.

Для объектов четвертого класса значения переменной $h(t)$, задающей состояние функционирования, для всех $t \in T$ неизвестны. На интервале T при моделировании объектов четвертого класса следует рассматривать множество

траекторий $h(\bullet)$ с началом в точке $h(t_0) = h_0$, соответствующих оператору ψ. Значения оператора γ могут быть представлены графом G изменений состояний функционирования. Будем обозначать модель объекта четвертого класса через $\mathcal{M}_G$ [184].

Используя модель $\mathcal{M}_G$, получают воронку всех траекторий $z(\cdot) = (z(t); t \in T)$. В этом случае значения фазового вектора $z(t), t > t_0$, как и в модели второго класса, являются случайными величинами. Вопросы оценки моментов для фазовых координат $z(t)$ для таких систем рассмотрены в [52].

В соответствии с классификацией систем на МСФ объекты, составляющие ТТА, в зависимости от решаемой задачи управления чаще всего относятся к третьему или четвертому классу [185].

Первым этапом проектирования ИИУС ТТА является анализ предметной области, на котором:

– исследуется состав технологического оборудования, входящего в ТТА;

– определяются режимы работы объектов управления;

– описываются модели объектов управления на множестве состояний функционирования (МСФ). На основании полученной информации определяются функциональные особенности, структура и тип ИИУС и формулируются цели ее функционирования. Формализуются задачи, определяющие функциональные возможности и особенности создаваемой ИИУС, и при наличии плохо формализуемых задач принимаются решения о применении и выборе методов искусственного интеллекта. Основными показателями эффективности функционирования ТТА являются энергосбережение, качество получаемого продукта и производительность технологического процесса. Одним из подходов повышение эффективности функционирования ТТА является разработка и внедрение в рамках модернизации производственных процессов в различных отраслях промышленности интеллектуальной информационно-управляющей системы инвариантной различным ТТА, позволяющей оперативно вырабатывать управляющее воздействие, минимизирующее энерго- или ресурсопотребление в

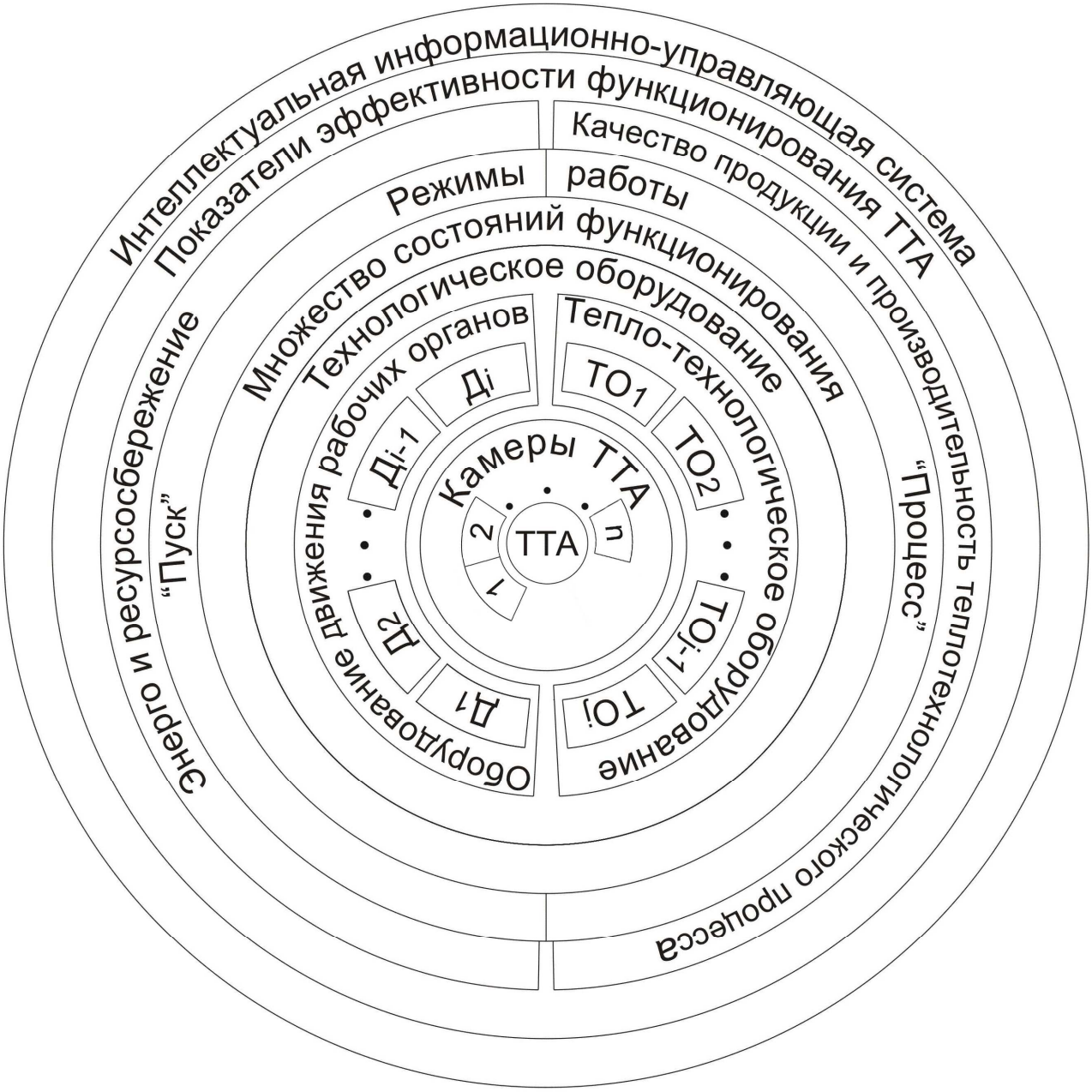


Рисунок 1.2. Концептуальная модель предметной области.

динамических режимах и минимизирующее потери качества и производительности тепло-технологических процессов.

Концептуальная модель предметной области, представленная на рис. 1.2 отражает базовую структуру ТТА и совокупность задач, решаемых на различных уровнях абстракции ИИУС, с целью оперативного синтеза оптимального управления.

При управлении процессами, протекающими в сушильной установке, необходимо оперативно измерять влажность или влагосодержание материала. Отсюда, важное значение имеют способы и средства измерения этих величин.

1.2.2 Способы и средства измерения

Как правило, выделяют прямые и косвенные способы измерения влажности материала. Приборы прямого способа измерения влажности позволяют произвести разделение исследуемого материала на влагу и абсолютно сухое вещество. Приборы косвенного способа измерения влажности измеряют некоторые величины, связанные с влажностью материала функционально. При косвенных способах необходимо предварительно произвести градуировку прибора для корректного отображения зависимости влажности материала от измеряемых величин. Различные методы измерения влажности, такие как нейтронный, кондуктометрический, инфракрасный, сверхвысокочастотный (СВЧ) и другие, применяют именно косвенный способ измерения [105].

Приборы прямого способа измерения влажности основаны на непрерывном нахождении массы контрольной пробы в процессе высушивания. В таких приборах завершают процесс сушки, когда два взвешивания подряд рассматриваемого образца дают с допустимой погрешностью одинаковые результаты. В процессе сушки скорость удаления влаги уменьшается и приближается к нулевому значению, поэтому считают, что при этом удаляется практически вся влага, содержавшаяся в образце. Поэтому, после достижения нулевого значения скорости сушки, прибор, исходя из значений исходной массы материала и его массы после высушивания, находит значение доли влаги в исходной пробе. Продолжительность этого способа измерения от получаса до нескольких часов. Увеличить скорость сушки возможно за счет повышения температуры процесса [106].

Приборы, используемые для реализации описанного способа измерения влажности, включают инфракрасную или галогенную камеру, измеритель веса и блок управления, предназначенный для обработки результатов измерений.

Измерения влажности твердых, пастообразных и сыпучих материалов, произведенные с помощью описанных приборов, имеют ряд методических погрешностей [105]:

а) во время сушки органических материалов помимо потерь гигроскопической влаги из них испаряются легколетучие соединения; кроме того, могут происходить окисление вещества в воздухе с поглощением кислорода, а также термическое разложение пробы;

б) достижение нулевого значения скорости сушки, приводящее к остановке процесса, происходит не при полном удалении влаги, а за счет достижения равновесия между давлением водяных паров в материале и в воздухе;

в) из коллоидных материалов без разрушения коллоидальной частицы нельзя удалить связанную влагу, что не возможно достичь в процессе сушки;

г) в ходе сушки у некоторых веществ образуется водонепроницаемая корка, которая препятствует полному удалению влаги.

С целью уменьшения указанных методических погрешностей применяют иногда сушку в вакууме, сушку в потоке инертного газа, сушку при пониженной температуре. Но для реализации этих способов используется другая, более сложная и дорогостоящая аппаратура [105].

Заметим, что приборы измерения влажности прямого способа наиболее точны, и безальтернативны для измерений влажности менее 1%. Недостатками приборов измерения влажности прямым способом являются большая продолжительность измерения, дороговизна самих приборов, и в некоторых случаях для измерения требуется разрушение образца.

Среди приборов измерения влажности косвенным способом большое распространение – вследствие своей дешевизны – получили резистивные (или кондуктометрические) измерители [3, 227, 228]. Принцип действия этих приборов основан на снятии показаний электрической проводимости

исследуемого материала, в виду того, что многие материалы, в сухом виде являясь диэлектриками, при увлажнении обладают способностью проводить ток. Известно, что удельное сопротивление многих влагосодержащих материалов может меняться в достаточно широком диапазоне и зависит от количества влаги в них. Широкий диапазон, иногда содержащий несколько порядков, отрицательно влияет на точность измерений резистивными приборами, прежде всего при измерении малых влажностей, при измерении с большим электрическим сопротивлением (> 100 Мом). Дестабилизирующие факторы в этих случаях дают большие погрешности измерений; получить точное значение сопротивления и на его основе определить точное значение влажности чрезвычайно сложно, тем более, учесть еще и влияние на электропроводность характеристик структуры исследуемого материала, формы и размеров пор в нем, наличия поверхностной влаги, неравномерности распределения внутренней влаги, наличия различных включений [71].

Также широко применяется емкостной (или диэлькометрический) способ косвенного измерения влажности [226], основанный на связи диэлектрической проницаемости материала с его влажностью. В виду того, что диэлектрическая проницаемость воды в разы превышает ее у большинства материалов, измерение диэлектрической проницаемости исследуемого материала при поглощении влаги (или высушивании), позволяет достоверно оценить его влажность. Этот способ традиционно используют для измерения влажности сыпучих, газообразных и твердых материалов. Для реализации емкостного способа могут использоваться датчики, содержащие специальную пленку с напылением с двух сторон слоя золота [96], эта пленка является диэлектриком конденсатора. Схемотехнически это измерение емкости преобразуется в постоянное напряжение. Измеряемая датчиком величина отражает зависимость диэлектрической проницаемости и оцениваемой влажности исследуемого материала [105].

Описанные датчики обладают рядом достоинств и недостатков, зависящих от используемых при производстве датчиков материалов. Применяемые в производстве материалы оказывают влияние на стабильность работы датчиков,

условия их эксплуатации, точность измерений, время, необходимое для преобразования величин [71].

В настоящее время также широко применяется способ косвенного измерения влажности материала – СВЧ [215]. СВЧ способ основан на том, что влажный материал представляет собой сложного состава диэлектрик, частицы воды и сухого вещества в нем перемешаны при этом, на границах разделов воды и сухого вещества в нем скапливаются электрические заряды. Помимо имеющейся внутрислойной поляризации, накопление зарядов приводит к структурной поляризации. Для разных влажных материалов различные типы поляризации по-разному влияют на суммарную поляризацию. Известно, что вода является сильно полярным веществом, поэтому ее присутствие существенно отражается на суммарной поляризации материалов. Функциональная связь влаги и диэлектрической проницаемости материала ярко выражается при сверхвысоких частотах в сантиметровом диапазоне, при этом диэлектрическая проницаемость воды попадает в область с аномальной дисперсией, где диэлектрические потери становятся максимальными, большими, чем у значительной части сухих веществ [105].

При измерении диэлектрических свойств сыпучих материалов широко применяется на практике способ, в основе которого лежит измерение степени затухания мощности плоской электромагнитной волны при ее нормальном падении на образец изучаемого материала, свободно расположенный на пути распространения волны [105].

Другим способом косвенного измерения влажности материала является нейтронный способ, основанный на замедлении скорости быстрых нейтронов при их столкновении с атомами вещества [191, 236], в виду того, что массы ядер исследуемого вещества и нейтронов соизмеримы. В случае столкновения с легкими атомами, такими как атомы водорода, энергетические потери могут быть существенными. Анизотропный поток быстрых нейтронов сохраняет свое направление при движении сквозь вещество и преобразуется в изотропный поток тепловых нейтронов, зарегистрировать который можно детектором,

располагающимся поблизости от источника быстрых нейтронов. Для реальной среды, содержащей как легкие, так и средние ядра, быстрые нейтроны могут испытывать не только упругие, но и неупругие столкновения. Однако, после существенной потери энергии, нейтроны в дальнейшем теряют свою энергию только на упругих столкновениях, роль неупругих столкновений мала.

Замедляющие свойства воды вычислены с учетом содержащегося в ней кислорода, большая замедляющая способность наблюдается у парафина, углеводороды имеют еще более высокие замедляющие свойства.

Приборы измерения влажности материала нейтронным способом используют описанное свойство разной замедляемости нейтронов для различных материалов [107].

Следующим способом косвенного измерения влажности материала является инфракрасный способ. В молекулах имеются два типа колебаний: валентные и деформационные. Энергия валентных колебаний значительно выше энергии деформационных, причем последние наблюдаются при больших длинах волн. Указанные типы колебаний создают как основные, обладающие наибольшей интенсивностью полосы поглощения, так и обертонные полосы с кратными основным частотами и меньшими интенсивностями поглощения. Разделение спектра по интенсивности поглощения соответствует энергетическому делению инфракрасной (ИК) области излучений на ближнюю (область обертонов) и среднюю (область основных колебаний) области. В ИК области поглощение излучения происходит не только целой молекулой, но и отдельными группами атомов, что лежит в основе ИК спектрального анализа состава вещества, а также присутствия различных групп атомов в изучаемом материале [105].

ИК спектральный анализ проводят специальными приборами – ИК-спектрометрами и ИК-спектрофотометрами, излучение с источника в которых к исследуемому образцу проходит через монохроматор, позволяющий выделить из пучка излучений монохроматическое с определенной длиной волны. После прохождения через изучаемый материал это излучение улавливает приемник,

затем сигнал усиливается и передается на обработку электронному блоку. В качестве используемых источников излучения видимого ИК-спектра могут выступать лампы накаливания, а в качестве приемников применяют фоторезисторы. Источниками излучений средней и дальней областей ИК-спекра обычно служат керамические стержни, приемниками – болометры, термопары и др. [105].

Измерение влажности инфракрасным способом, обычно применяется в управляющих системах различными технологическими процессами в реальном масштабе времени для бесконтактного косвенного контроля влажности различных материалов (порошкообразных, пастообразных, гранулированных, сыпучих, слоистых). В этом методе должна регистрироваться прозрачность, отражающая отношение прошедшего сквозь вещество и падающего потоков [188].

Отметим ряд недостатков описанных прямых и косвенных способов определения влажности материала, делающих невозможным их использование для измерения влагосодержания материала в многосекционных установках. Прямые способы требуют доработки конструкции сушилок. Косвенные способы имеют ряд ограничений, например, в СВЧ способах и способах, основанных на измерении сопротивления, исследуемый материал необходимо размещать равномерно, что сложно обеспечить. СВЧ способ нельзя применять, если в зоне измерения присутствуют металлические элементы. В приборах инфракрасного спектрального измерения влажности могут появляться различные погрешности из-за работы в запыленных условиях. Также отметим, что существующее оборудование для измерения влажности пастообразного материала при его сушке имеет высокую стоимость, а его установка связана с модернизацией сушильного оборудования. В связи с этим актуальным является разработка интеллектуального датчика влажности для применения в ИИУС многокамерных сушильных установок.

1.2.3 Задачи оптимального управления

Интенсивное развитие теории оптимального управления обычно связывают с принципом максимума Понтрягина [212, 176], динамическим программированием [56, 57, 207] и прилегающими исследованиями. Эта теория служит методологической базой решения различных прикладных задач, связанных с оптимальным управлением, в них состояния исследуемого объекта в любой фиксированный момент времени можно задать некоторым вектором в конечномерном пространстве. Динамика объекта может быть задана с помощью обыкновенных дифференциальных или конечно-разностных уравнений. Значительные успехи в исследовании различных задач оптимального управления конечномерными системами были достигнуты с помощью развитого Н.Н.Красовским и его учениками метода *L*-проблемы моментов [137, 134, 135, 138, 139].

При использовании указанных принципов, методов, теорий исследователи столкнулись с рядом трудностей, состоящих, прежде всего, в том, что для процессов, описываемых бесконечномерными системами, не удалось найти достаточно универсальную постановку задачи, с полными и проверяемыми условиями оптимальности. Кроме того, даже в тех случаях, для которых указанные условия оптимальности решаемой задачи были сформулированы, возникали принципиальные сложности их практического использования в нахождении оптимального управления и его приближений [180].

Как правило ТТА являются объектами с распределенными параметрами. Многочисленные исследования задач оптимального управления тепловыми процессами заложили основы специальной ветви этой теории, которую называют теорией оптимального управления системами с распределенными параметрами. Переходные процессы в таких системах обычно можно описать дифференциальными и интегро-дифференциальными уравнениями с дополнительными (начальными и граничными) условиями.

При проектировании оптимальных систем управления на практике сталкиваются с рядом проблем, при решении которых необходимы достаточно глубокие знания в теории оптимального управления и ее приложениях к техническим аспектам. В книге американских исследователей М.Атанса и П.Фалба [52] содержится достаточно полное изложение теории оптимального управления для детерминированных систем. Книга содержит рассмотрение многочисленных примеров, которые иллюстрируют изучаемые понятия теории и дает необходимые навыки синтеза оптимальных систем на практике.

Постановки задач оптимального управления системами с распределенными параметрами были даны А.Я.Лернером и А.Г.Бутковским, ими получены результаты по решению ряда задач [56]. При управлении подобными объектами решались задачи создания оптимально управляющих систем по различным критериям. Рассматривались минимизируемые функционалы, которые зависели от пространственных переменных, от функции состояния и управляющих воздействий, распределенных в пространстве [57].

В литературе широко рассмотрены различные постановки задач оптимального управления (ЗОУ), в которых минимизируется некоторый функционал, отражающий ресурсо- или энерго- затраты [160, 161, 52, 5, 200, 149, 254, 139, 60, 61, 59, 244, 6, 195, 101].

Задачу оптимального энергосберегающего управления можно задать в общем виде. Обозначим через A, B – матрицы параметров модели; $t_0, t_к$ – начальное и конечное значения временного интервала управления; $z^0, z^к$ – начальное и конечное значения вектора управления; $u_н, u_в$ – нижнюю и верхнюю границы изменения управляющего воздействия; n – размерность вектора z.

Пусть задана динамическая модель объекта в виде системы линейных дифференциальных уравнений

$$\overset{\circ}{z} = Az(t) + Bu(t), \qquad t \in [t_0, t_к], \tag{1.4}$$

при этом условия на вектор фазовых координат z и скалярное управление u имеют вид:

$$z(t_0) = z^0 = \left(z_1^0, z_2^0, ..., z_n^0\right)^{\text{т}}, \qquad z(t_{\text{к}}) = z^{\text{к}} = \left(z_1^{\text{к}}, z_2^{\text{к}}, ..., z_n^{\text{к}}\right)^{\text{т}}, \tag{1.5}$$

$$\forall t \in [t_0, t_{\text{к}}]: \quad u(t) \in [u_{\text{н}}, u_{\text{в}}]. \tag{1.6}$$

Требуется минимизировать функционал

$$I = \int_{t_0}^{t_{\text{к}}} f_0(u(t))dt. \tag{1.7}$$

Также необходимо для заданного массива исходных данных

$$R = \left(A,\ B,\ u_{\text{н}},\ u_{\text{в}},\ z^0,\ z^{\text{к}},\ t_0,\ t_{\text{к}}\right) \tag{1.8}$$

найти такое управление $u^*(t)$, при котором для условий (1.4)–(1.6) функционал (1.7) достигает минимума [180].

Для выше сформулированной задачи функция $f_0(u(t))$ задает вид функционала затрат, при минимизации энергопотребления она имеет вид (1.1) [52, 200], при минимизации ресурсопотребления – вид (1.2) [52, 149].

Описанная задача (1.4)–(1.7) является задачей оптимального управления с условием на управляющее воздействие, заданным интервалом времени и закрепленными концами траектории вектора фазовых координат. Обычно за первую компоненту вектора управления z для тепловых объектов принимают среднюю температуру исследуемого тела, за вторую координату принимают скорость изменения температуры и т.д. При электронагреве и для машин с электроприводом за управление u принимают напряжение или силу тока в сети. Иногда в качестве управления выбирают расход топлива или теплоносителя [180].

Кроме задачи (1.4)–(1.7) можно рассматривать другие постановки ЗОУ. Для энергосберегающего управления динамикой некоторого объекта это могут быть следующие задачи [180]:

1. Задачи управления с нефиксированным временным интервалом управления $[t_0, t_{\text{к}}]$, в которых конечное время $t_{\text{к}}$ принадлежит некоторому интервалу или удовлетворяет некоторому условию:

$$t_{\text{к}} \in [t_{к,н},\ t_{к,в}] \quad \text{или} \quad t_{\text{к}} \le t_{\text{к, доп}}, \tag{1.9}$$

здесь $t_{к,н}, t_{к,в}$ – границы возможных значений, а $t_{к,доп}$ – допустимое значение для $t_к$ [180].

2. Задачи управления, использующие интегральное ограничение для управления, в которых задается допустимый лимит расхода электроэнергии ($I_{э\,доп}$)

$$\int_{t_0}^{t_к} u^2(t)dt \le I_{э\,доп}\,, \tag{1.10}$$

или топлива ($I_{т\,доп}$)

$$\int_{t_0}^{t_к} |u(t)|dt \le I_{т\,доп}\,. \tag{1.11}$$

3. Задачи управления, использующие комбинированные минимизируемые функционалы:

энергии и времени

$$I_{э+б} = \int_{t_0}^{t_к} \left(c_б + u^2(t)\right)dt \to \min_{u,t_к}, \tag{1.12}$$

или топлива и времени

$$I_{т+б} = \int_{t_0}^{t_к} (c_б + |u(t)|)dt \to \min_{u,t_к}, \tag{1.13}$$

топлива и энергии (для гибридных объектов)

$$I_{т+э} = \int_{t_0}^{t_к} (c_т |u_т(t)| + c_э u_э^2(t))dt \to \min_{u_т,u_э} \tag{1.14}$$

и т.д. [180].

4. Задачи управления, использующие дополнительные ограничения для траектории $z(\cdot)$ фазовых координат. Например, скорость изменения температуры не может превышать допустимое значение, что можно записать в виде

$$z(\cdot) = \left(z(t), t \in [t_0, t_к]\right) \in \chi(\cdot)\,, \tag{1.15}$$

здесь $\chi(\cdot)$ – допустимая область принадлежности фазовых координат.

5. Задачи управления с частично закрепленным правым концом $z^к$ траектории фазовых координат, когда некоторые из компонент закреплены на правом конце, а другие нет [180].

При анализе и синтезе различных динамических объектов широко применяются математические модели стохастических структур [10], модели, заданные с учетом множества состояний функционирования, и другие [160, 161, 182, 185]. Ранее применялся детерминистский подход [138, 253]. Для компенсации не учитываемых ошибок и возмущений используется обратная связь.

Начиная с 60-х годов XX века, стала развиваться теория управления, использующая стохастический подход [171, 204, 268], одно из первых описаний этого см. в книге Лэннинга и Бэттина [156]. Их результаты основаны на теории оценивания с использованием минимальной среднеквадратической ошибки. В работе Ньютона, Гульда и Кайзера [199] уже изучалась задача управления. Последующие исследования прошлого века базируются на фундаментальном труде Фельдбаума [251] с дополнениями Аоки [10].

Теория стохастических систем оптимального управления сейчас достаточно хорошо развита [64, 8, 113, 170, 234]. В тоже время, практическое применение этой теории недостаточно разработано.

ИИУС, способные решать задачи энергосберегающего управления, имеют сложное алгоритмическое обеспечение, хотя эти системы применяют те же инструментальные и аппаратные средства, что и другие автоматизированные системы управления.

В последние десятилетия появились тенденции внедрения различных усовершенствований в автоматизированные системы управления и расширение спектра решаемых ими задач управления, продиктованные усилением требований к качеству производимой продукции, к точности выполнения решаемых задач управления в реальном масштабе времени, к сложности технологического оборудования [174, 219, 223, 159, 255], к интеллектуализации решения трудно формализуемых задач.

Действующие на объекты управления, составляющие ТТА дестабилизирующие факторы (ДФ) оказывают существенное влияние на работу ИИУС, 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 проектировании ИИУС учитывать влияние ДФ.

1.3 Дестабилизирующие факторы в каналах управления и измерения

При проектировании ИИУС ТТА необходимо учитывать ДФ в каналах измерения (погрешности датчиков, квантования аналоговых сигналов и т.д.) и управления (колебания напряжения в сети и т.д.). На практике фактические значения напряжения электросети могут отличаться от номинального на 10-25% в сторону уменьшения и на 10-17% в сторону увеличения, частота снижаться до 49,3Гц, нелинейные искажения могут достигать 18%. Эти изменения можно рассматривать как ДФ в ИИУС. Это существенно влияет на их работу, снижает точность выхода на заданные режимы и приводит к увеличению потребления энергии. При использовании аппаратных средств стабилизации напряжения повышается стоимость ИИУС и, увеличиваются затраты электроэнергии за счет питания стабилизаторов. Для повышения эффективности работы ИИУС при наличии ДФ могут применяться алгоритмы оптимальной фильтрации и прогнозирования, рассмотренные в разделе 5.

1.3.1 Анализ и классификация дестабилизирующих факторов

Термин ДФ можно отнести к специфической группе входных сигналов системы, а именно к неуправляемым входным сигналам, т.к. они не известны

заранее и, вследствие этого не могут быть учтены при проектировании. Наличие ДФ приводит к нежелательным эффектам в работе изучаемых систем, вследствие чего оказывает существенное влияние на задачу управления. Приведем примеры ДФ для систем управления ТТА. Такими факторами могут являться погрешности измерительных приборов, погрешности получения параметров модели, колебания тока в электросети, колебания давления пара в установке и др.

В реальных системах управления выделяют обычно два типа ДФ: шум и ДФ волнового типа [253]. В теории стохастической устойчивости, теории управления и теории фильтрации, как правило, рассматривают ДФ типа шум [64, 170, 201].

Различают «белые» и «цветные» шумы. «Белый» шум представляет собой математическую абстракцию. Однако, многие помехи конечного спектра можно приблизить понятием «белый» шум. Такое допущение можно использовать тогда, когда спектр действующего сигнала существенно шире полосы пропускания системы. Обычно применяется гауссовский «белый» шум [54, 65, 163, 208, 260] с нулевым математическим ожиданием и нормальным распределением.

У всех действующих в реальных физических системах случайных сигналов присутствует корреляционная зависимость между предыдущим и последующим значениями, что приводит к практическому использованию вместо понятия «белого» шума так называемого «цветного» шума.

В работе [266] модель «цветного» шума была описана в следующем виде:

$$w = w_1 + w_2,$$

здесь w – «цветной» шум, w_1 – коррелированная компонента, w_2 – белая (некоррелированная) компонента.

Работа [64] предлагает модель перехода от «цветного» шума к эквивалентному «белому» шуму, состоящую в замене коррелированной компоненты «белым» шумом с приблизительно такой же корреляционной функцией.

При анализе шумов в реальных системах возникают сложности в определении их характеристик. В задачах оценивания характеристик

дестабилизирующих факторов, действующих в динамических системах, поступают следующим образом. На первом шаге налагают ряд условий на систему и решают задачу с этими ограничениями. На втором шаге введенные условия ослабляют и решают более общую задачу [253].

Для нестационарных систем применяют другую методику. Заранее задают распределение состояний исследуемой системы, распределения шумов состояний и шумов измерений, а затем применяют байесовский подход, или метод наименьших квадратов [69], или метод максимального правдоподобия [234] с целью получения оценок математических ожиданий, дисперсий и корреляций. В работе [7] приведен пример определения дисперсии помехи случайных сигналов.

1.3.2 Модели временных рядов для прогнозирования случайных величин

Динамическим (или *временным*) рядом будем называть последовательность наблюдений некоторой случайной величины в различные моменты времени. При анализе динамических рядов применяют стационарные временные ряды, чьи вероятностные характеристики не меняются с течением времени. «Белый» шум представляет собой простейший пример стационарного динамического ряда [140].

Одной из основных задач анализа временного ряда является задача прогнозирования на его основе дальнейшего протекания исследуемого процесса [66, 123, 206]. С этой целью применяют такие модели, как [140]:

– Авторегрессионная модель p-го порядка (обозначается AP(p)):

$$x_t = \phi_0 + \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + ... + \phi_p x_{t-p} \quad (t = 1,2,..., n),$$

здесь x_t – временной ряд, $\phi_0, \phi_1, ..., \phi_p$ – коэффициенты модели. Эта модель задает значение процесса в любой момент времени t по его p значениям в предшествующие моменты времени $t-1,\ t-2,...,\ t-p$.

В том случае, когда поведение изучаемого процесса x_t в каждый момент времени t зависит только от его значения на предыдущем шаге t-1, тогда применяют модель авторегрессии первого порядка:

$$x_t = \phi_0 + \phi_1 x_{t-1} \quad (t = 1,2,..., n).$$

Модель авторегрессии первого порядка АР(1) является марковским случайным процессом и применяется в прогнозировании случайных процессов [231].

– Модель скользящего среднего q-го порядка (обозначается СС(q)):

$$x_t = \varepsilon_t + \gamma_1 \varepsilon_{t-1} + \gamma_2 \varepsilon_{t-2} + ... + \gamma_q \varepsilon_{t-q}.$$

– Комбинированная модель авторегрессии и скользящей средней порядков p и q соответственно (обозначается АРСС(p, q)):

$$x_t = \phi_0 + \phi_1 x_{t-1} + ... + \phi_p x_{t-p} + \varepsilon_t + \gamma_1 \varepsilon_{t-1} + ... + \gamma_q \varepsilon_{t-q}.$$

– Модель экспоненциального сглаживания [275, 274]:

$$x_t = \alpha \xi_{t-1} + (1-\alpha) x_{t-1},$$

здесь ξ_{t-1} – текущие наблюдения, α – числовой параметр.

Использование прогнозирующих моделей в задачах оптимального управления описано в [135, 136, 265]. Простейшими оценками качества прогнозирования является абсолютная погрешность и среднеквадратичная ошибка [104].

1.3.3 Оптимальная фильтрация случайных сигналов

Современная теория фильтрации зародилась в 1940 году, в котором А.Н. Колмогоров [129] и Н. Винер [288] независимо друг от друга опубликовали исследования по этой проблематике. При изучении стационарных случайных процессов на бесконечном временном интервале наблюдения они использовали независящий от времени фильтр. Критерием качества у них служила среднеквадратичная ошибка. Р.Бутон (1952) распространил интегральное уравнение Хопфа-Винера на нестационарные случайные процессы и зависящие

от времени фильтры [273]. Р.Калман (1960) создал рекуррентный метод оценки внутреннего состояния системы для нестационарных случайных процессов с дискретным временем [280], получивший название фильтра Калмана. В 1961 г. Р.Калман в совместной работе с Р.Бьюси распространили этот результат на процессы с непрерывным временем [281]. Работы [280, 281] послужили толчком к дальнейшему развитию и применению теории фильтрации Калмана-Бьюси [208, 170, 234, 65, 54].

Когда динамическая система работает стабильно, и отсутствуют нарушения состояний функционирования, тогда с целью получения оценок вектора состояния на основе последовательных наблюдений применяют известные методы теории линейной фильтрации [10, 113, 170] с применением фильтра Калмана.

Пусть динамическая система задана уравнениями состояний

$$x(k+1) = F(k+1,k)x(k) + G(k+1,k)w(k)$$

и измерений

$$y(k) = H(k)x(k) + v(k),$$

здесь $x(k)$ – n-мерный вектор, задающий состояние системы; $F(k+1,k)$ – ее переходная матрица $n \times n$; $w(k)$ – r-мерный случайный вектор гауссовских шумов возмущений с корреляционной матрицей шумов $E[w(k)w^T(j)] = D_w(k)\delta(kj)$, где $E[\ ]$ – оператор усреднения, $\delta(kj)$ – символ Кронекера; $G(k+1,k)$ – переходная матрица шумов $n \times r$; $y(k)$ – вектор измерений размерности s; $H(k)$ – матрица измерений системы $s \times n$; $v(k)$ – m-мерный вектор гауссовских шумов измерений с корреляционной матрицей $E[v(k)v^T(j)] = D_v(k)\delta(kj)$. За начальное значение состояния $x(0)$ принимают случайный вектор, распределенный нормально, имеющий среднее значение $\bar{x}(0)$ и корреляционную матрицу $P(0)$. Полагают, что для любых k, j имеет место $E[w(k)w^T(j)] = 0$, что означает некоррелированность шумов $w(k)$ и $v(k)$.

Сформулируем задачу фильтрации: по совокупности измерений $\{y(1), y(2),..., y(k)\} = Y_1^k$ необходимо получить оценку вектора состояния $x(k)$, оптимальную в том смысле, что она имеет минимальную среднеквадратичную ошибку. Будем обозначать эту оптимальную оценку $\hat{x}(k \mid k)$, а ее ошибку

$$\tilde{x}(k \mid k) = x(k) - \hat{x}(k \mid k).$$

Известно, что оценка вектора состояния будет иметь минимальную среднеквадратичную ошибку, если за нее выбирать условное среднее

$$\hat{x}(k \mid k) = E\{x(k) \mid Y_1^k\}.$$

Поэтому, чтобы получить требуемую оценку, следует знать условную плотность распределения $f[x(k) \mid Y_1^k]$.

Итак, алгоритм получения оптимальной оценки вектора состояния некоторой динамической системы задается системой конечно-разностных уравнений [89].

Имеем уравнение оценки

$$\hat{x}(k \mid k) = \hat{x}(k \mid k-1) + K(k)\hat{x}(k \mid k-1),$$

здесь $K(k)$ – матрица коэффициентов усиления фильтра:

$$K(k) = P(k \mid k-1)H^T(k)\left[H(k)P(k \mid k-1)H^T(k) + D_w(k)\right]^{-1}.$$

Для корреляционной матрицы ошибок фильтрации имеет место

$$P(k \mid k) = P(k \mid k-1) - P(k \mid k-1)H^T(k)\left[H(k)P(k \mid k-1)H^T(k) + \right.$$
$$\left. + D_w(k)\right]^{-1} H(k)P(k \mid k-1).$$

Для корреляционной матрицы ошибок экстраполяции имеем

$$P(k \mid k-1) = F(k, k-1)P(k-1 \mid k-1)F^T(k, k-1) +$$
$$+ G(k, k-1)D_v(k-1)G^T(k, k-1).$$

Заданы следующие начальные условия

$$\hat{x}(0 \mid 0) = \bar{x}(0), P(0 \mid 0) = P(0).$$

Получаемый описанным способом оптимальный фильтр называется фильтром Калмана. Оптимальный фильтр Калмана является динамической

системой с переменной матрицей коэффициентов усиления, зависящих от точности получаемых оценок и измеряемых интенсивностей шумов [89].

Для вывода уравнений фильтра Калмана предполагается, что матрица $D_v(k)$ шумов измерений положительно определена.

В практических целях интересны также случаи, когда [163]

1) матрица шумов измерений $D_v(k)$ вырождена (в том числе, когда $D_v(k) \equiv 0$);

2) нормально распределенный шум измерений $v(k)$ получается на выходе детерминированной линейной системы с белым шумом;

3) для шума $v(k)$ заданы математическое ожидание, ковариационная матрица, элементами которой являются квадратично интегрируемые (по Лебегу) функции.

Первый случай описан в работах [163, 272, 152, 162, 293, 284, 285], второй случай изучался в работах [276, 277, 93, 282, 286]. Третий случай менее отражен в литературе.

При выводе фильтра Калмана использовалось условие того, что шумы, действующие как в канале управления, так и в канале измерения – «белые». Как уже было отмечено выше, обычно приходится сталкиваться с «цветными» шумами. На практике возникают следующие ситуации [266].

1. ДФ, действующие по каналу управления (обозначим их w), коррелированны, т.е. w – «цветной» шум. При этом используются два варианта действий: первый – расширение вектора состояния [266], второй – переход к эквивалентному «белому» шуму [64]. В первом варианте шум w разлагается в сумму коррелированной w_1 и белой (некоррелированной) w_2 составляющих: $w = w_1 + w_2$. Во втором варианте заменяют коррелированный шум некоррелированным «белым» шумом с приблизительно такой же корреляционной функцией.

2. ДФ, действующие по каналу измерения (обозначим их v), коррелированны, это означает, что v – «цветной» шум. Для его моделирования применяют формирующий фильтр Калмана-Бьюси [65].

3. ДФ, действующие по каналам управления w и измерения v, коррелированны: $E\left[w(k)v^T(j)\right]=T(k)\delta(kj)$. В этом случае также используется классическая модель фильтра Калмана-Бьюси [65].

Работы [67, 124, 139, 145, 9] посвящены решению задач фильтрации с неопределенными возмущениями в уравнениях движения и измерения, при этом заданы только допустимые области измерений. Работа [145] рассматривает управление и наблюдение в условиях неопределенности, в ней изучаются ошибки оценивания и минимаксная фильтрация для систем с запаздыванием. Кроме того, минимаксное оценивание в системах с распределенными параметрами представлено в работе [174].

Работы [10, 102] посвящены решению задачи оптимальной фильтрации, где одна группа дестабилизирующих факторов считается случайными процессами, другая задается областями возможных значений.

В монографии [112] рассматриваются оптимальные фильтры для случайных систем, описывающихся дифференциальными уравнениями переменной структуры на различных временных интервалах.

Задачи фильтрации с скачкообразными измерениями рассмотрены в работах [75, 271]. Монография [65] посвящена исследованию задач с позиционными измерениями и минимаксной фильтрацией для дифференциальных уравнений с запаздыванием в каналах измерения и управления системы, при неизвестном начальном положении системы и неопределенных помехах, подчиняющихся некоторому интегральному условию. Работы [97, 125, 128, 260] изучают задачи фильтрации по имеющимся непрерывным и дискретным измерениям.

В статье [287] изучено применение методов теории информации к решению проблем фильтрации.

1.4 Стратегии и методы решения задач, используемых в информационных системах с искусственным интеллектом

ТТА, как объекты управления, традиционно представляют собой нелинейные системы с распределенными параметрами. На практике решение системы уравнений тепло- и массопереноса в большинстве случаев затруднительно, и для расчета основных параметров процесса обычно применяют упрощенные инженерные методы, имеющие большие погрешности вычислений. В связи с этим данные методы не желательно использовать при синтезе управляющих воздействий [55]. Однако технология современного искусственного интеллекта позволяет находить решение задач управления подобными объектами.

1.4.1 Интеллектуальные и интеллектуализированные информационные системы

Интеллектуальные системы – быстро развивающийся класс систем для решения плохо формализованных или неформализованных задач. Принято различать интеллектуальные и интеллектуализованные информационные системы. Интеллектуальные информационные системы представляют собой информационно-вычислительные системы, имеющие интеллектуальную поддержку, которая позволяет решать различные задачи без лица принимающего решения (ЛПР). Интеллектуализированные системы представляют собой информационно-вычислительные системы, имеющие интеллектуальную поддержку, которая позволяет решать различные задачи с ЛПР. Интеллектуальная информационная система способна самостоятельно принимать решения, т.е. получать и анализировать информацию, понимать ее и делать выводы, формулировать заключения [76].

Интеллектуальная система способна принимать решения, когда:

1) требуется обработать и провести анализ большого массива информации;

2) информация ограничена;

3) требуется работать в условиях неопределенности;

4) пространство многомерно;

5) требуется распознать ситуации;

6) на решение задачи влияют нестационарные факторы;

7) задача формализована с использованием моделей представления знаний;

8) требуются самоорганизация, самообучение, адаптация системы.

Интеллектуальная информационная система должна включать соответствующие математическое, методологическое, информационное, программное, аппаратное и техническое обеспечения для адекватного решения задач с вышеперечисленными условиями [76].

Академик П.К. Анохин в 1989 году разработал концепцию структуры интеллектуальных систем, которая легла в основу целого направления научных исследований и практической разработки интеллектуальных систем [219].

В виду того, что в качестве интеллектуальной системы рассматривается совокупность математического, методологического, программного, аппаратного, технического обеспечения, которая объединена информационным процессом, поэтому различные составляющие системы должны обладать возможностью обработки получаемой информации о проблемной области, подобно тому, как это происходит в мозге человека [219]. Рядом авторов [77, 78, 108] предлагается использовать системный и междисциплинарный подходы в создании методологии интеллектуальных систем, применение которых дает дополнительную возможность разработки эффективных методов теории сложных процессов, характеризующихся большим объемом обрабатываемой информации, трудно формализуемыми задачами принятия решений в условиях неопределенности, различными проблемами в использовании традиционных методов многокритериальной оптимизации.

Уровень развития информационных технологий в настоящее время позволяет эффективно решать проблемы жизни и деятельности человека с целью их облегчения путем автоматизации различных процессов. Для ряда задач, в частности

для задач вычислительной математики, для задач построения классических информационных систем, имеются явные методы и алгоритмы их решения. В то же время, для определенного класса интеллектуальных задач решение базируется на некоторой формализации, позволяющей, аналогично мыслительной деятельности человека, использовать программную реализацию соответствующей модели знаний [9].

Практически уникальными способами эффективно представить и использовать знания в интеллектуальных информационных системах в общем случае являются формальная логика и символьные рассуждения. Интеллектуальная информационная система должна содержать следующие основные элементы [9, 243]:

- машину логического вывода, позволяющую манипулировать знаниями и координировать работу системы;
- базу данных, обеспечивающую накопление, поиск, запись и хранение информации;
- базу знаний, содержащую совокупность декларативных и процедурных знаний в некотором представлении, обеспечивающую процесс решения задач;
- интерфейс сопряжения различных элементов системы между собой и с окружающей средой.

В настоящее время широко применяются системы искусственного интеллекта в таких областях, как вычислительная математика, химия, биология, экология, геология, медицина, военное дело, микроэлектроника, радиоэлектроника, вычислительная техника, юриспруденция, экономика, транспортная инфраструктура и другие [76, 108, 77, 78, 74, 9, 243, 216]. В то же время, применение интеллектуальных систем при управлении тепло-технологическими процессами с целью минимизации энерго- и ресурсо-потребления, потерь качества выпускаемой продукции и производительности процесса, не достаточно освещены в отечественной и зарубежной литературе.

Однако заметим, что достигнутые значительные успехи в создании информационных систем с искусственным интеллектом пока еще не привели к

ликвидации существующего разрыва между возможностями искусственного интеллекта и практическим применением его в отечественном производстве [9].

1.4.2 Общая характеристика моделей представления знаний и решений неформализованных задач

Как правило, интеллектуальные системы используются при нахождении пути решения задач, в которых в большей степени применяется не вычислительная, а логическая обработка информации, соответствующей полученным знаниям от экспертов. Причем эти знания обычно слабо-формализованы. Отличительной особенностью информационных интеллектуальных систем служит наличие знаний, адекватно описывающих исследуемую предметную область конкретной задачи [9]. Основные сложности разработки информационных интеллектуальных систем состоят в полноценном представлении знаний и их обработке. Если основу информационной системы составляет модель предметной области с соответствующей базой знаний, которая представлена при помощи специализированного языка или объектно-ориентированного подхода, то такие системы относятся к интеллектуальным [74].

Информационные интеллектуальные системы оперируют данными и знаниями. Данные – это фактическая информация об объектах, процессах, явлениях предметной области, и их свойствах. Знания – это совокупность данных, структура их взаимосвязей и способы обработки данных. Знания представляют собой более сложную категорию информации в сравнении с данными, их обычно называют структурированными данными [9].

Ученые, работающие в области искусственного интеллекта, приводят и другие определения знаний. “Знания – это закономерности предметной области (принципы, связи, законы), полученные в результате практической деятельности профессионального опыта, позволяющие специалистам ставить и решать задачи в этой области” [74]. “Знания – это хорошо структурированные данные или данные о

данных, или метаданные” [74]. “Знания – формализованная информация, на которую ссылаются или используют в процессе логического вывода” [216].

Знания, как и данные, делятся на декларативные и процедурные. Знания являются декларативными, если в них содержатся описания различных фактов и явлений, их связей и закономерностей. Знания являются процедурными, когда они описывают последовательности действий, применяемых при обработке информации о некоторых фактах и явлениях, и необходимых для достижения поставленных целей [78].

Чтобы информационная интеллектуальная система могла оперировать знаниями, их следует представить в заданной форме. Имеются две основные формы представления знаний в информационных интеллектуальных системах. Первая предполагает размещение знаний в компьютерных программах, созданных с использованием традиционных языков программирования без объектно-ориентированного подхода. В этом случае знания не являются отдельной категорией, так как создаваемая система представляет собой единый код программы. Эта форма, несмотря на решение поставленной задачи, имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, в этом случае трудно отделить знания от процесса решения задач, что приводит к почти неразрешимым сложностям пополнения базы знаний. Во-вторых, постоянно требуется модификация программы, которая в этом случае является достаточно сложным процессом.

При второй форме представления знаний основой является применение концепции баз данных (БД), при которой знания выделяются в отдельную категорию, т.е. представляются в определенном виде и размещаются в базе знаний (БЗ). Одно из преимуществ этой формы состоит в том, что база знаний может пополняться и легко модифицироваться, т.к. она представляет собой достаточно автономную часть информационной интеллектуальной системы. В то же время следует учитывать, что машина логического вывода и набор средств ведения диалога обладают своими закономерными особенностями, накладывающими соответствующие ограничения на структуру БЗ и набор операций с ней [9].

В различных предметных областях применяются свои модели представления знаний. Наиболее популярными среди них являются сетевые, продукционные, фреймовые, логические модели. Последние применяются в системе исчисления предикатов первого порядка. Логические модели характеризуются единственностью теоретического представления и возможностью реализации формальных определений, закономерностей, выводов. Поэтому множество исследований (например [126]) посвящено применению именно логических моделей.

Логическая модель задается следующим упорядоченным кортежем множеств [213]:

$$M = <T, P, A, B>,$$

где T – множество базовых элементов модели, имеющих различную природу; P – совокупность синтаксических правил, с помощью которых из элементов T могут быть образованы синтаксически правильные подмножества; A – фиксированное подмножество в множестве синтаксически правильных подмножеств, элементы которого называют аксиомами; B – множество правил вывода.

Если к элементам множества аксиом A применить правила вывода из множества B, то получатся новые синтаксически правильные подмножества, к которым вновь можно применять правила вывода – так формируется множество выводимых подмножеств данной логической системы. Можно полагать, что множество аксиом A составляют все введенные в базу знаний извне информационные единицы. При помощи правил вывода из этих аксиом производятся новые знания. Таким образом, формальные логические системы являются генераторами новых знаний, выводимых в исходных системах знаний, что позволяет эффективно их использовать в БЗ информационных интеллектуальных систем. Эта модель делает компактной базу знаний, т.к. достаточно сохранять лишь знания, входящие в множество аксиом A, все другие знания получаются с использованием правил вывода [166].

Для сетевых моделей применяют конструкцию так называемой семантической сети. Эти модели задают следующим кортежем:

$$H = <I, C_1, C_2, ..., C_n, \Gamma>,$$

где I – некоторое множество единиц информации; C_1, C_2, ..., C_n – множества различных типов связей между элементами из I; Γ – отображение, отражающее вид зависимостей между единицами информации множества I.

Типы связей сетевой модели позволяют выделить так называемые сценарии, функциональные сети и классифицирующие сети. Последние основаны на отношениях структуризации. Классифицирующие сети дают возможность вводить в базы знаний некоторую иерархию отношений ее информационных единиц. В основе функциональных сетей лежат заданные функциональные отношения. Эти сети являются “вычислительными моделями”, дающими возможность задавать одни вычислительные процедуры через другие.

Частным случаем сетевой модели является семантическая сеть, включающая связи различных типов. Семантическая сеть может включать связанные между собой объекты, их свойства, операции над ними, протекающие события и др. [76]. Поиск пути решения в базе знаний семантической сети состоит в нахождении фрагмента сети, соответствующего поставленной цели [193, 214, 247, 257]. Преимущество сетевой модели заключается в том, что она отражает современные представления о структуре человеческой памяти, а ее недостатком является сложность поиска пути решения в базе знаний.

Продукционные модели включают ряд элементов как логических, так и сетевых моделей. В методике создания логических моделей был взят метод построения правил вывода, называемых продукциями в этой модели. В методике создания сетевых моделей взят метод представления знаний семантической сетью. Применение продукционных правил к семантической сети дает определенную ее трансформацию, при которой изменяются некоторые ее фрагменты, добавляются новые (происходит наращивание сети), исключаются ненужные фрагменты (происходит секвестирование сети). В продукционных моделях, таким образом, процедурная информация выделена, и для ее описания используются другие способы, а не просто представление данных. В продукционных моделях происходит вывод, основанный на знаниях. Эти модели

представления знаний становятся усовершенствованием логических моделей (использующих логический вывод), за счет более эффективного их описания и генерации новых знаний [115, 175, 205]. В них продукцию описывают следующим образом:

$$(i);\ Q;\ P;\ A{=>}B;\ N,$$

где (i) – имя продукции, выделяющее ее из множества продукций; Q – область использования продукции; P – условие, при котором продукция возможна; $A{=>}B$ – ядро (основной элемент) продукции; N – действие, которое необходимо выполнить после выполнения продукции [76].

Фреймовая модель представления знаний была описана М.Минским в 70-е годы XX века, в ней абстрактные образы или события называют фреймами [92]. В других работах под фреймами понимают формализованные модели для отображения образов [177]. Фрейм может быть задан следующей структурой [76]:

<*frame name*>:
[<*part* 1>] (<*slot name* 1>: <*slot value* 1>);
[<*part* 2>] (<*slot name* 2>: <*slot value* 2>);

[<*part N*>] (<*slot name N*>: < *slot value N*>).

Структурными единицами, составляющими фрейм, выступают слоты, которые обычно представляют в виде:

$$\text{<slot name>}: \{(A_i, v^i)\},\ \{r^i\},$$

где A_i – имя признака, v^i – его значение, r^i – связь данного слота с другими.

В качестве значения слота могут выступать числа, символы, математические формулы, обычные тексты и тексты программ, продукционные правила, ссылки на другие слоты, принадлежащие как данному фрейму, так и другим фреймам, набор слотов более низкого уровня (иерархическая реализация) и т.д.

Основное достоинство фреймовой модели знаний состоит в способности отражать структуру человеческой памяти. Реализовать фреймовую модель возможно с помощью принципов объектно-ориентированного программирования, используя следующие соответствия терминов: фрейм есть класс, слот – метод, данные – свойства метода.

Пытаясь формализовать человеческие знания, ученые натолкнулись на трудности применения стандартных математических методов и логического аппарата их представления. Также, при решении информационными интеллектуальными системами задач обычно приходится работать в условиях неопределенности, т.е. иметь дело с нечеткими знаниями, не имеющими точной интерпретации в терминах истина–ложь. В 70-х годах XX века американский математик Л. Заде для представления нечетких знаний и оперирования с ними предложил использовать нечеткую (fuzzy) алгебру и нечеткую логику. Л. Заде ввел понятие лингвистической переменной в качестве одного из основных понятий нечеткой логики, определив ее как переменную, значение которой определяется термом (набором) словесных (вербальных) характеристик и функций принадлежности термов некоторым свойствам [74].

В области создания баз знаний информационных интеллектуальных систем сейчас уже имеется серьезный прогресс, достаточное количество теоретических разработок, широкий спектр методов и технологий, поддерживаемых соответствующими программными комплексами. В то же время, дальнейшее развитие теории информационных интеллектуальных систем, создание новых методов и технологий работы со знаниями остаются по-прежнему актуальными проблемами [74].

1.5 Проблемы и подходы к решению задач синтеза в процессе разработки информационных систем

В синтезе информационно-измерительных и информационно-управляющих систем выделяются две основные задачи: параметрический синтез и структурный

синтез. Обе эти задачи можно отнести к области принятия проектных решений [197]. Параметрический синтез заключается в выборе числовых значений параметров системы, в то время как структурный синтез состоит в преобразовании описания разрабатываемой системы от исходного к целевому. Для разрабатываемой системы исходное описание включает информацию о свойствах объекта, условиях его функционирования, требования к элементному составу и т.д. Целевое описание должно иметь сведения об архитектуре системы (элементы и технические средства, способы их взаимодействия). Структурный синтез как раз и состоит в разработке архитектуры системы, выборе соответствующих программных и технических средств. В структурном синтезе важным является решение задачи распределения функций разрабатываемой системы по программно-аппаратным средствам так, чтобы выбранная целевая функция достигала своего экстремума с учетом введенных условий.

Основными проблемами в задачах принятия решений при синтезе информационно-измерительных и информационно-управляющих систем являются:

– сложность представления альтернативных вариантов системы в компактном виде;

– неоднозначность вариантов абстрагирования при построении модели системы и выбора метода оценки параметров;

– неоднозначность выбора целевой функции и приоритетности критериев в случае многокритериальности;

– неколичественный характер всех или некоторой части используемых критериев и, отсюда, сложность процедуры выбора среди альтернатив;

– определение оптимальных методов, позволяющих уменьшить количество вариантов перебора.

Задачи синтеза информационно-измерительных и управляющих систем имеют большие размерности [197], поэтому для упрощения процесса их решения следует применять разбиение системы в совокупность подсистем, связанных между собой некоторой иерархической структурой, и для каждой подсистемы

решать соответствующую задачу синтеза. Применение данного блочно-иерархического подхода позволяет декомпозировать систему и разложить процесс решения общей задачи синтеза на проще реализуемые этапы, что существенно упрощает решение поставленной задачи.

При решении задач структурного синтеза информационно-измерительных и управляющих систем широко применяются комбинаторно-логические методы, в основу которых положен удачно организованный перебор аналогов и прототипов, составляющих массив решений.

Комбинаторно-логические методы решения задач структурного синтеза

К комбинаторно-логическим методам относятся: морфологический синтез, синтез по альтернативным графам, синтез по многодольным графам, логические системы синтеза и др. [62]. Морфологический синтез осуществляется с использованием так называемой морфологической таблицы (M), содержащей множества описаний функций компонентов синтезируемой системы, с соответствующими подмножествами, задающими способы реализации этих функций. Строка таблицы задает функцию, ячейка в строке – способ реализации этой функции. Таким образом, элемент M_{ij} таблицы описывает j-й способ реализации i-й функции синтезируемой системы, задаваемой матрицей инцидентности M [197].

С помощью морфологических таблиц удобно осуществлять неавтоматизированный синтез информационно-измерительных и управляющих систем. Морфологические таблицы позволяют разработчику оперативно рассматривать все возможные альтернативные варианты, и не упустить те из них, которые остались бы без внимания, если бы не использовалась эта таблица.

Сама морфологическая таблица M не имеет способов синтеза информационно-измерительных и управляющих систем, в то же время, с использованием таблицы M появляется возможность получения методов синтеза с элементами алгоритмизации [197].

Недостатками использования морфологических таблиц являются, прежде всего, не учет невозможных сочетаний составляющих элементов синтезируемой системы, и то, что в них не конкретизированы существующие связи между элементами системы. Также при построении морфологических таблиц предполагают взаимную независимость множества вариантов, приводящую к тому, что набор способов реализации конкретной функции остается неизменным, если меняются способы реализации других функций. Однако, такое предположение допустимо только для систем, имеющих достаточно простые структуры. Устранить этот недостаток становится возможным при использовании комбинированного метода, сочетающего метод морфологических таблиц с методом И-ИЛИ-графов.

В комбинированном методе морфологическая таблица может быть задана в виде дерева. Она представляет собой множество однотипных систем, которые задаются одинаковым набором функций. Разнотипные системы задаются с помощью многоярусных И-ИЛИ-графов. Заметим, что И-ИЛИ-дерево представимо в виде множества морфологических таблиц. В этом случае, И-вершина дерева отражает конкретную морфологическую таблицу, причем сохраняется соответствие *i*-я выходящей ветви и *i*-ой функции. ИЛИ-вершина, являющаяся концом *i*-й ветви, отражает множество реализаций *i*-й функции, причем *j*-я ветвь, выходящая из ИЛИ-вершины, отражает *j*-ю реализацию.

При алгоритмизации синтеза с использованием И-ИЛИ-графов следует сформулировать правила определения подходящей альтернативы для каждой ИЛИ-вершины. Обычно, эти правила эвристические, т.к. продиктованы условиями технического задания, и отражают запрет на невозможные сочетания конкретных элементов системы [80, 99, 211].

Стандартными ограничениями на совместность различных способов реализации конкретных функций являются следующие:

$$C_{ij} \ and \ C_{pq} = false, \tag{1.16}$$

где C_{ij}=*true*, когда элемент C_{ij} входит в рассматриваемый вариант, в противном случае C_{ij}=*false*. Условие (1.16) означает, что одновременное вхождение элементов C_{ij} и C_{pq} не допустимо.

Заметим, что при подобных ограничениях существенно возрастают сложности поиска эффективного решения задачи. Набор условий вида (1.16) представляет собой совокупность логических уравнений, в которых неизвестными являются C_{ij}. Задачу синтеза систем здесь решают эволюционными методами, и одновременно с ней решают задачу о выполнимости (набор логических уравнений).

С целью описания обобщенных структур на начальных этапах проектирования обычно применяют матаппарат *N*-дольных графов. В описании структур проектируемых систем и процессов в них элементы многодольных графов истолковываются следующим образом:

– основные технические подфункции класса – доли;

– технические реализации – вершины доли.

С помощью морфологической таблицы задается обобщенная структура класса. Подобная интерпретация позволяет применять методы теории морфологических таблиц для решения задач структурного синтеза информационно-измерительных и управляющих систем. Таким образом, выбор структурных решений на многодольном графе не нуждается в разработке специализированных алгоритмов, а возможно применять стандартные методы теории графов. Из теории графов известно, что задача выбора некоторого полного подграфа с фиксированным количеством вершин решается разными способами: или напрямую, или путем сведения к другим конфигурациям графа [94].

В работе [4] изучаются алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях, в ней предложена другая схема решения вышеописанной задачи, сформулированной в [4] в виде задачи об изоморфном вложении графов.

Многие задачи дискретной математики и теории графов являются *NP*-трудными. Описанная выше задача и ее варианты решения также *NP*-трудные, т.е. все возможные алгоритмы поиска полного подграфа с фиксированным числом вершин обладают экспоненциальной трудоемкостью.

Задача принятия решений при решении задач синтеза

Обобщенное описание задачи принятия проектных решений (ЗППР) при структурном синтезе информационно-измерительных и управляющих систем можно представить в виде кортежа [197]:

$$\text{ЗППР} = <C, K, Мод, П>,$$

здесь C – множество различных альтернатив проектного решения, $K=(K_1, K_2,..., K_m)$ – множество выходных параметров (критериев), позволяющих провести оценку соответствия выбранной альтернативы поставленным целям; *Мод*: $A \to K$ – модель, задающая для всякой альтернативы A вектор критериев K; $П$ – решающее правило выбора наилучшей возможной альтернативы при многокритериальной ситуации [197].

Всякой альтернативе ставится в соответствие упорядоченный набор атрибутов $X=<x_1, x_2,... x_n>$, описывающий свойства данной альтернативы. Здесь каждая x_i является величиной одного их следующих типов: *real*, *integer*, *boolean*, *string*. Для типа *string* величина x_i называется лингвистической (предметной).

Обозначим через N – множество всех управляемых параметров альтернатив. Когда все элементы множества N допускают количественные оценки, тогда применяют приближенные методы оптимизации. Когда множество N содержит неколичественные параметры, тогда целесообразнее применять эволюционные методы вычислений, в частности методы, использующие генетические алгоритмы. Под множеством N понимают: в теории баз данных – запись, в теории искусственного интеллекта – фрейм, в генетических алгоритмах – хромосому.

В том случае, когда среди атрибутов x_i содержатся параметры, отражающие структуру моделируемой системы, тогда модель *Мод* называется структурно-критериальной [197].

Чаще всего при структурном синтезе известна алгоритмическая модель, позволяющая, зная множество *N* и структуру системы, найти вектор критериев *K*. Иногда указанные модели оказываются неизвестными из-за сложности процессов, но при этом может быть известна некоторая априорная информация (совокупность измерений) об объекте исследования. В этих случаях используют различные методы идентификации моделей. Такие модели называются феноменологическими. К феноменологическим относятся модели, полученные по методам планирования эксперимента, а также модели, построенные на базе искусственных нейронных сетей [197].

Когда модель $X \to K$ неизвестна, в этих случаях используют подход, основанный на применении искусственного интеллекта, в частности экспертных систем [197].

В общем случае задачи дискретного программирования относятся к классу *NP*-полных задач. Эти задачи даже умеренного размера получается решать лишь приближенными методами [197]. Отсюда вытекает применение эвристических (приближенных) методов к решению большинства практических задач структурного синтеза. Эвристические методы используют специфику конкретного класса задач и, как правило, не дают оптимального решения, а приводят лишь к близким к оптимальным результатам. Затраты вычислительных ресурсов в эвристических методах являются приемлемыми [197].

К эвристическим относятся эволюционные методы структурного и параметрического синтеза.

Эволюционные методы при решении задач структурного и параметрического синтеза

Методы математического программирования относятся к числу точных методов. Эволюционные методы дают возможность за приемлемое время

получать близкие к оптимальным решения. Они отличаются от эвристических методов большей универсальностью, эволюционные методы значительно меньше зависят от приложений и применимы, в том числе, для задач с лингвистическими переменными [197].

Эволюционные методы используют при поиске более предпочтительных решений. Они используют статистический подход в исследовании состояний системы и итерационное приближение к оптимальному состоянию [197].

Среди эволюционных методов наиболее популярными в применении считаются метода с использованием генетических алгоритмов (ГА). При нахождении лучших решений в основу генетических алгоритмов положена процедура наследования и усиления необходимых свойств системы в процессе мутации этих свойств [197].

Перед использованием генетических алгоритмов требуется произвести следующие действия [197]:

1) выделение множества управляемых параметров $X=(x_1, x_2, \dots x_n)$, параметры x_i являются внутренними параметрами системы, x_i описываются различными типами данных: *real*, *integer*, *Boolean*, *enumeration*. Т.к. среди параметров x_i присутствуют нечисловые (*enumeration*), то это позволяет решать задачи как параметрической, так и структурной оптимизации;

2) определение функции полезности F вариантов системы, позволяющей проводить количественную оценку. Для многокритериальной задачи определение функции F означает задание обобщенного (скалярного) критерия;

3) разработка модели системы в виде алгоритма вычисления функции полезности при заданном N;

4) представление в виде хромосомы вектора N.

В теории генетических алгоритмов применяется следующий набор терминов: управляемый параметр – ген; значение гена – аллель; позиция гена в хромосоме – локус; экземпляр хромосомы – генотип (генотип есть набор внутренних параметров синтезируемой системы); множество всевозможных генотипов – генофонд; целевая функция синтеза системы – функция полезности

F; сочетание генотипа с значением функции полезности – фенотип (фенотип есть совокупность выходных параметров синтезируемой системы) [197].

При структурном и параметрическом синтезе информационно-измерительных и управляющих систем меняются разнообразные генетические алгоритмы. Рассмотрим базовый пример генетического алгоритма.

Простой генетический алгоритм. Сначала случайным выбором из аллелей каждого гена генерируется исходное поколение, представляющее собой множество *N* хромосом (*N* – размер популяции). Затем реализуется циклическое воспроизводство новых поколений:

```
for (k=0; k<G; k++)
{
 for (j=0; j<N; j++)
 {
        Выбор родительской пары хромосом;
        Кроссовер;
        Мутации;
        Оценка функции полезности потомков;
        Селекция;
 }
Замена текущего поколения новым
}
```

Для внешней итерации выполняется внутренний цикл, при этом формируются экземпляры следующего поколения. На каждой итерации внутреннего цикла производится выбор родительской пары хромосом, кроссовер, мутации, оценка функции полезности потомков, селекция хромосом для включения в новое поколение [197]. Рассмотрим подробнее операторы, составляющие простой генетический алгоритм.

Выбор родительской пары хромосом. Этот оператор имитирует естественный отбор, отбор в родительскую пару хромосом осуществляется по наилучшим значениям функции полезности *F* [197].

Кроссовер (скрещивание, кроссинговер). Кроссовер заключается в передаче участков генов от родителей к потомкам. При простом (одноточечном) скрещивании хромосомы родителей разрываются в некоторой позиции,

одинаковой для обоих родителей, выбор места разрыва равновероятен, далее происходит рекомбинация образующихся частей родительских хромосом [197].

Мутации. Оператор мутации выполняется с некоторой вероятностью, с которой происходит замена некоторого аллеля случайно выбранным (с равной вероятностью) другим аллелем. Благодаря мутациям область генетического поиска расширяется [197].

Селекция. После каждой генерации пары потомков и оценки функции полезности потомков в новое поколение включается лучший экземпляр пары. Внутренний цикл заканчивается, когда число экземпляров нового поколения станет равным N [197].

Количество внешних итераций G задается автоматически до появления признаков стагнации или вырождения популяции, с учетом не превышения лимита машинного времени [196].

При использовании генетического алгоритма для выбора близкого к оптимальному решения поставленной задачи свойства систем определяются вектором значений параметров, называемым ЭМ-хромосомой [196].

Генетические алгоритмы оперируют, как правило, множеством хромосом. В отличие от них некоторые эволюционные методы используют единственную хромосому. Например, метод дискретного локального поиска основан на стохастичности отдельных параметров или случайном характере значений генов в хромосоме. Эти случайные изменения значений также считают мутациями. После каждой мутации производится оценка функции полезности F, результат мутации записывается в хромосому в случае, когда значение функции F улучшилось.

При другом эволюционном методе, носящим название «моделирование отжига», мутация сохраняется с заданной вероятностью, которая зависит от значения функции полезности F [198].

1.6 Цель и постановка задачи исследования

Цель диссертационной работы заключается в обеспечении ресурсо- и энергосбережении, минимизации потерь качества производимой продукции и производительности тепло-технологических процессов путем разработки и внедрения методологии построения интеллектуальной информационно-управляющей системы инвариантной различным тепло-технологическим аппаратам, позволяющей оперативно синтезировать управляющее воздействие по энергетическим и качественным критериям.

Для достижения поставленной цели данной работы требуется решить следующие *задачи* исследования:

1. Разработать методологию построения ИИУС ТТА состоящую в исполнении *этапов* анализа, структурирования системы, постановок задач, моделирования, алгоритмизации, построения альтернативных архитектур, программной и аппаратной реализации; *концепций*: системного анализа, комплексного моделирования; *теорий*: анализа и синтеза систем на множестве состояний функционирования, оптимального управления, фильтрации, регрессионного анализа, электрических измерений, иерархических и интеллектуальных систем, линейных направленных графов; *методов*: синтезирующих переменных, искусственного интеллекта, объектно - ориентированного программирования, современных информационных технологий; *технологии* интеллектуализации синтеза оптимального управления.

2. Разработать метод интеллектуализации синтеза, базирующуюся на основе интегрированного графа. Указанный граф должен отражать представление множества задач алгоритмизации синтеза управления ТТА в пространстве состояний.

3. Развить теории и методы интеллектуализации параметрического синтеза решения задач управления.

4. Поставить и решить задачу структурного построения ИИУС ТТА.

5. Постановить задачи управления с учетом особенностей ТТА, решаемых ИИУС.

6. Провести анализ состояния вопросов математического моделирования, представляющего объект на множестве состояний функционирования (МСФ), и решения задач энерго- и ресурсосберегающего оптимального управления процессами в ТТА.

7. Создать аналитические модели, описывающие динамические режимы объектов на МСФ, пригодных для решений задач оптимального управления.

8. Разработать аналитические модели, описывающие управляемые процессы ТТА на МСФ и не содержащих опытных коэффициентов.

9. Разработать процедурные модели, пригодные для классификации возможных ситуаций в ТТА и выработки управляющих воздействий, отличающиеся использованием накопленного опыта экспертов.

10. Разработать расширенную стратегию энерго- и ресурсосберегающего управления с учетом наличия дестабилизирующих факторов в каналах управления и измерения.

11. Разработать алгоритмы управления процессами в ТТА, учитывающие влияние большого числа возмущающих воздействий и обеспечивающих заданные качество выпускаемой продукции и производительность процесса.

12. Создать интеллектуальный датчик влажности, основанный на нейронных сетях, обучение которых организуют по образцовым мерам в адаптивном диапазоне контролируемых камер с фиксированной точностью.

13. Создать метод оценки влажности движущегося пастообразного материала с использованием интеллектуального датчика влажности.

14. Разработать методологическое, математическое, алгоритмическое, информационное, интеллектуальное, программное и техническое обеспечение ИИУС ТТА.

15. Создать инфологические модели для построения базы данных и функциональные модели для построения базы знаний. На основании моделей разработать базы знаний и данных ИИУС ТТА.

16. Создать исследовательские и рабочие прототипы интеллектуальной информационно-управляющей системы, осуществляющей поставленную техническую задачу (без ЛПР) оперативно реализовывать оптимальное управление, минимизирующее: энерго- и ресурсопотребление, потери качества выпускаемой продукции и производительности ТТА.

17. Провести анализ практической значимости созданной технологии алгоритмизации синтеза решений задач управления процессами ТТА.

18. Создать рабочие прототипы ИИУС для установки отжига магнитопроводов – ТОМ-1 и вальцеленточных сушильных установок – СВЛ.

2 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Глава посвящена разработке и развитию методологических основ построения ИИУС ТТА. Методология построения ИИУС ТТА базируется на

– *концепциях*: системного анализа, комплексного моделирования;

– *теориях*: анализа и синтеза систем на множестве состояний функционирования, оптимального управления, фильтрации, регрессионного анализа, электрических измерений, интеллектуальных и иерархических систем, линейных направленных графов;

– *методах*: искусственного интеллекта, современных информационных технологий и объектно-ориентированного программирования.

Она является естественным развитием методологий создания автоматизированных систем оптимального управления и модульного построения автоматизированных информационно-управляющих систем обработки данных. Отличительной особенностью предлагаемой методологии являются следующие подходы построения ИИУС ТТА это: теория анализа и синтеза систем на МСФ; метод синтезирующих переменных для оперативного получения вида функций оптимального управления и их параметров в режиме «Пуск»; методы искусственного интеллекта для решения трудно формализуемых задач режима «Процесс»; технология интеллектуализации синтеза решения задач управления режимами «Пуск» и «Процесс» ТТА, реализованная в виде интегрированного графа.

2.1 Методы и алгоритмы построения системы

При построении ИИУС ТТА требуется разработать ее математическое, методологическое, информационное, алгоритмическое, программное и

техническое обеспечение. При этом используются традиционные подходы, такие как методы системного анализа, математического моделирования, искусственного интеллекта, теории дифференциальных уравнений, оптимального управления, многокритериальной оптимизации, регрессионного анализа, теории нечетких множеств, а также раздел комбинаторной топологии – линейные направленные графы, электрические измерения, фильтрация, нейронные сети, генетические алгоритмы, информационные технологии и технологии объектно-ориентированного программирования, алгоритмы поиска решения задачи в пространстве состояний [16, 43].

Наряду с этим используются теории и методы, разработанные научной школой профессора Ю.Л. Муромцева: теория анализа и синтеза решений задач на множестве состояний функционирования (МСФ) [185, 181], метод синтезирующих переменных для оперативного получения вида функций оптимального управления (ОУ) и их параметров [160].

Кроме того, при разработке математического и алгоритмического обеспечения ИИУС ТТА были развиты методы и алгоритмы адаптивного [14] и робастного управления [45], с учетом особенностей ТТА, а также использованы методы искусственного интеллекта для решения трудно формализуемых задач (см. табл. 2.1).

Модели, используемые в ИИУС ТТА, должны быть пригодными для решения в реальном времени поставленных задач анализа и синтеза, поэтому их предлагается идентифицировать с учетом множества состояний функционирования [32, 261, 35, 46, 47, 15, 31, 130]. Исследовательский прототип ИИУС ТТА, созданный с применением предложенных в данной диссертационной работе методов и алгоритмов, позволяет получать модели с разрывной правой частью переменной структуры, адекватно описывающие динамические режимы «пуска» тепло-технологического оборудования [37, 90, 48, 31, 84, 35]. Идентификация аналитических моделей трудно формализуемых процессов ТТА (режим «процесс») проведена с использованием нейронных сетей [43, 17, 209, 210, 22, 44]. Для создания баз данных ИИУС ТТА разработана информационная

модель предметной области, которая базируется на теоретико-множественном подходе. Процедурная модель оценки меры доверия к достижению требуемых значений на выходе ТТА строится на базе метода Демпстера-Шафера [209].

Таблица 2.1. Задачи ИИУС ТТА, решаемые с использованием методов искусственного интеллекта

Задачи	*Методы*
Параметрическая идентификация моделей слабо формализованных процессов	Нейронные сети
Синтез управляющего воздействия в динамических режимах объектов ИИУС в целях экономии энергоресурсов, в том числе при наличии дестабилизирующих факторов	Объектно-ориентированное представление знаний фреймами. Семантическая сеть представленная в виде И–ИЛИ графа. Представление знаний правилами продукций
Определение процедуры косвенного измерения, лежащей в основе интеллектуальных датчиков используемых в системе	Нейронные сети
Диагностика работоспособности оборудования интеллектуальных датчиков и выбор адекватной модели косвенного измерения значения фактора, влияющего на качество выпускаемой продукции	Семантическая сеть представленная в виде И–ИЛИ графа. Представление знаний правилами продукций.
Синтез оптимального управляющего воздействия, позволяющего обеспечить качество выпускаемой продукции не ниже требуемого при оптимальной производительности	Нечеткая логика. Нечеткий логический вывод. Теория Демпстера-Шафера
Определения состояния функционирования и распознавание классов управления и измерения	Семантическая сеть представленная в виде И–ИЛИ графа
Обработка потоков информации	Семантическая сеть
Структурный синтез систем	Генетические алгоритмы
Синтез решения задач управления	Семантическая сеть, представленная в виде И–ИЛИ графа

Важной является проблема структурного построения ИИУС ТТА, решение которой есть выбор наиболее перспективной архитектуры создаваемой системы из множества альтернативных архитектур [16]. Эта проблема сформулирована как задача многокритериальной оптимизации, решение которой осуществлено с использованием эволюционных методов [198], в частности генетических алгоритмов [196].

Целями функционирования ИИУС ТТА являются минимизация энерго- и ресурсо- потребления в режиме «Пуск» и минимизация потерь качества и производительности в режиме «Процесс». Решение этих задач осуществлено посредством технологии интеллектуализации синтеза оптимального управления, реализованной в виде интегрированного графа [43]. При разработке этой

технологии применялись: стратифицированная концепция иерархии, раздел комбинаторной топологии – линейные направленные графы, объектно-ориентированный подход и подход решения задач в пространстве состояний на И-ИЛИ графе. Построенный граф назван «Технология интеллектуализации синтеза оптимального управления» [233](см. раздел 2.8).

В основе функционирования ИИУС ТТА лежат следующие разработанные алгоритмы:

– синтеза оптимальной программы управления при использовании многостадийных моделей режима «Пуск» [32, 46, 47, 43, 84, 48, 90, 25, 19, 85, 21, 37, 40],

– синтеза оптимального управления в учетом ДФ, действующих по каналам управления и измерения (позиционного энергосберегающего управления, с фильтром Калмана при наличии ДФ в канале измерения, с прогнозирующей моделью при наличии ДФ в канале управления) [85, 12, 45, 38, 28, 27, 26, 24, 18, 29, 187, 30, 14],

– синтеза управления режимом «Процесс» [22, 44],

– управления нагревом многокамерного ТТА (комбинированный) [84],

– функционирования интеллектуального датчика влажности (адаптивный) [209, 210, 22, 44].

Синтез управляющих воздействий в режиме «процесс» требует проведения исследований конкретных тепло-технологических процессов ТТА [43, 32]. В диссертационной работе в качестве ТТА рассмотрены следующие объекты управления:

– сушильные установки вальце- ленточного типа (СВЛ),

– печи отжига магнитопроводов (ТОМ-1).

Наибольшее внимание было уделено процессу сушки, протекающему в СВЛ. В ходе проводимых исследований возникла необходимость оперативной оценки влажности пастообразного материала в СВЛ в процессе его сушки. Для решения этой проблемы была разработана методика создания интеллектуальных датчиков влажности [16], реализованная в конкретном образце. В основе этой

методики лежат метод оценки влажности пастообразного материала [210] и адаптивный алгоритм функционирования интеллектуального датчика влажности (представляющего собой систему датчиков) с учетом отказов его составляющих. В результате работы адаптивного алгоритма интеллектуальный датчик влажности представляет собой отказоустойчивую систему. При создании адаптивного алгоритма функционирования интеллектуального датчика влажности выделялись классы ситуаций отказов датчиков, для которых построены аналитические модели оценки влажности на базе нейронных сетей. Разработанный адаптивный алгоритм дает возможность функционирования интеллектуального датчика влажности в случаях отказа его составляющих, с приемлемой для решения задач погрешностью.

С целью минимизации потерь качества и производительности процесса в основу интеллектуального синтеза управляющих воздействий положен метод сушки пастообразных материалов с изменением скорости пластинчатого конвейера [209]. Для разработки этого метода в результате проведенного анализа на множестве состояний функционирования выделены классы ситуаций, для которых определены различные алгоритмы управления [15]. Один из основных этапов разработки заключается в введении лингвистических переменных, определяющих входные и выходные параметры процесса [16]. В роли входных переменных выступают функции принадлежности следующих термов следующих лингвистических переменных: влажности материала в контролируемых камерах и меры доверия к влажности материала на выходе сушильной установки, а в качестве выходной лингвистической переменной использованы функции принадлежности термов изменения скорости движения пластинчатого конвейера [209].

Нечеткий вывод в реальном времени осуществляется с использованием продукционных правил Мамдани, соответствующих выделенным классам. При преобразовании выходной переменной в численное значение используются три различных метода: метод центра тяжести, метод первого максимума и метод медианы. На основании полученных с помощь этих методов значений

определяется интервал допустимых изменений управляющих воздействий, для которого мининимизируется функционал, задающий потери качества выпускаемой продукции и производительности исследуемого процесса [16]. Оценка влажности пастообразного материала проводится посредством интеллектуального датчика влажности [210].

Подробное описание подходов, методов и алгоритмов, используемых в разрабатываемой методологии построения ИИУС ТТА, приведено в последующих главах диссертационной работы. Рассмотрим основные этапы и технологии построения ИИУС ТТА.

2.2 Этапы методологии построения системы

Предложенная методология построения оптимальных информационно-управляющих систем тепло-технологических аппаратов включает следующие этапы [16].

1. Этап ***анализа предметной области***, на котором исследуют и классифицируют по различным типам решаемых задач объекты, составляющие ТТА. Для этих объектов следует определить их режимы работы и множество состояний функционирования. В ходе этого этапа также выявляются функциональные особенности ИИУС ТТА, структура и тип ИИУС, т.е. выделяются по функциональному назначению две главные – управляющая и измерительная – подсистемы, составляющие основную систему. Затем необходимо определить информационные особенности ИИУС, т.е. структуру информационных потоков и связей подсистем.

Далее формулируются цели и задачи функционирования ИИУС ТТА, определяются оценки эффективности создаваемой ИИУС, создаются концептуальная и информационные модели предметной области ИИУС ТТА.

2. Этап ***постановок задач***, на котором формулируются постановки задач: структурного построения ИИУС ТТА, энерго- или ресурсосберегающего

управления режимом «Пуск», управления режимом «Процесс» с целью снижения потерь качества выпускаемой продукции и производительности ТТА, измерения, а также определяются стратегии решения поставленных задач.

3. Этап ***моделирования***, на котором идентифицируются модели, пригодные для решения задач управления и измерения; создаются информационные модели (предметной области, ER – модели, функциональные модели; определяются модели представления знаний), создается структура имитационной модели ИИУС ТТА.

4. Этап ***анализа и синтеза задач управления,*** на котором с учетом множества состояний функционирования и типов моделей объектов. Для динамических моделей режима «Пуск» определяют: условия существования решения, классы и виды функций, области существования видов функций в пространстве синтезирующих переменных, разрабатывают алгоритмы расчета параметров функций управления; для моделей режима «Процесс» определяют: подмножество возможных состояний функционирования, классы ситуаций, алгоритмы управления, соответствующие выделенным классам.

5. Этап ***алгоритмизации***, на котором создаются алгоритмы решения поставленных задач синтеза управляющих воздействий.

6. Этап ***алгоритмизации синтеза решения задач управления***, на котором производится построение интегрированного графа технологии алгоритмизации синтеза управляющих воздействий.

7. Этап ***построения альтернативных архитектур*** ИИУС ТТА, на котором синтезируются несколько альтернативных архитектур ИИУС ТТА и определяется оптимальная архитектура ИИУС ТТА; выбираются технические и аппаратные средства, реализующие функции ИИУС ТТА; проводится проверка эффективности ИИУС ТТА.

8. Этап ***программной и аппаратной реализации*** ИИУС ТТА, на котором создаются программные и аппаратные модули ИИУС ТТА, реализующие полученные алгоритмы, и управляющие аппаратными средствами.

2.3 Технологии построения системы

Из анализа литературных источников [197, 62, 196, 198] известно, что задачи структурного синтеза проектных решений относятся к числу наиболее сложных и трудно формализуемых. Эти сложности обусловлены, во-первых, тем, что свойства исследуемого объекта, как правило, определяются большим количеством противоречивых, случайных, не до конца изученных факторов. Во-вторых, при решении задач синтеза наилучший вариант решения обычно приходится выбирать из очень большого множества возможных решений, иногда даже счетной мощности. Более того, когда задача синтеза ставится в терминах некоторой формальной системы, тогда для определения такого выбора следует решать задачу большой размерности [197].

Постановка задачи построения связана с различными этапами процесса проектирования ИИУС ТТА. В процессе проектирования систем могут быть выделены следующие основные этапы: предварительный этап, технического проектирования и рабочего проектирования. Процесс синтеза состоит из последовательного выполнения следующих процедур, которые упорядочены в соответствии с проведенной декомпозицией процесса проектирования.

В ходе предварительного этапа синтезируются основные, принципиальные решения, задающие информационную концепцию ИИУС ТТА. При этом выполняется анализ предметной области, в результате которого определяется: состав ТТА, задачи управления и измерения, технологии их решения, требуемая информация для решения, а также формулируются требования пользователей ИИУС ТТА к ее эффективности и качеству [16].

В ходе этапа технического проектирования синтезируются уточняющие решения, реализующие техническую концепцию ИИУС ТТА. При этом выполняется следующий комплекс работ по структурному построению ИИУС ТТА: выбор оптимального комплекса технических и программно-аппаратных средств, на базе которого реализуется ИИУС ТТА; определение множества выполняемых функций ИИУС ТТА; построение оптимальной структуры

программного обеспечения ИИУС ТТА и разработка его спецификаций; выбор типа используемого автоматизированного банка данных, определение логической и физической структуры базы данных; определение используемых моделей представления знаний и структуры базы знаний [16].

В ходе этапа рабочего проектирования синтезируются параметры системы, и создается документация на ИИУС ТТА.

Предлагается при построении структуры ИИУС в постановку задачи включать следующие исходные данные:

– пригодные технические средства для реализации функций системы;

– внешние источники и потребители информации;

– некоторая исходная структура системы (как вариант первого приближения) в виде взаимосвязанной совокупности программно-аппаратных средств определенных типов;

–ограничения на системные связи, на затраты ресурсов, на время выполнения функций системой [16].

Под структурой ИИУС понимается совокупность составляющих систему элементов и организация связей между ними.

Результатом решения задачи структурного построения является проектное решение архитектуры ИИУС ТТА [16]. При построении архитектуры должны быть учитываться следующие свойства [98]:

– слабая связанность элементов (декомпозицию следует производить так, чтобы поток информации через связи был минимальным, и через них не замыкались контуры автоматического регулирования);

– тестируемость (возможность установления факта правильного функционирования);

– диагностируемость (возможность нахождения неисправностей);

– ремонтопригодность (возможность восстановления работоспособности);

– простота обслуживания и эксплуатации (минимальные требования к квалификации персонала);

– безопасность (соответствия требованиям техники безопасности);

– защищенность от несанкционированного доступа;

– экономичность (экономическая эффективность в процессе функционирования);

– модифицируемость;

– функциональная расширяемость;

– возможность изменения конфигурации;

– максимальная длительность жизненного цикла (без существенного морального старения);

– минимальное время на пуск-наладку.

Основной из работ проводимых на стадии технического проектирования, является декомпозиция системы по функциональному назначению на подсистемы и составляющие их функциональные модули [98, 144], реализующие решения задач ИИУС ТТА. Декомпозиция технологий построения ИИУС ТТА на стадии проектирования представлена в таблице 2.2. При этом, на основании анализа предметной области, были определены информационные особенности системы, потоки и связи информации для подсистем при этом обеспечивается экстремум заданного критерия разбиения, учитывающего удобство последующего детального анализа, разработки и внедрения ИИУС ТТА.

На основе результатов, полученных на этапе анализа предметной области, происходит построение перспективной структуры ИИУС ТТА, т.е. определяются: основные подсистемы, оптимальный состав процедур в функциональных модулях подсистем, проектируется интерфейс системы и определяется ее математическое, информационное, техническое и программное обеспечение. При этом одним из наиболее важных критериев выделения подсистем и функциональных модулей является минимизация числа информационных связей системы. Система должна быть представлена в виде набора слабо связанных частей. Слабая связь между частями системы означает отсутствие обратных связей, а также интенсивного обмена информацией [98].

Для минимизации числа информационных связей системы большое значение при проектировании ИИУС ТТА имеют задачи типизации [144]

проектных решений при разработке алгоритмического, программного и информационного обеспечения создаваемых ИИУС различными ТТА. Задачи типизации включают в себя анализ требований и характеристик имеющегося множества объектов, требующих энерго- или ресурсосберегающего управления, и выбора из многообразия методов синтеза управляющего воздействия ограниченного множества решений, достаточно эффективно выполняющих поставленные цели управления.

Таблица 2.2 Декомпозиция технологий построения ИИУС ТТА на стадии проектирования

Стадии проектирования		
Предварительное	Техническое	Рабочее
Принимаются основные принципиальные решения, составляющие информационную концепцию ИИУС ТТА. При этом выполняется: 1. Анализ предметной области, в результате которого определяется информационная модель ТТА: – состав ТТА, –множество состояний функционирования ТТА, –режимы работы; –цели управления; –постановка задач управления. 2.Формулировка цели и задачи функционирования ИИУС ТТА. 3.Выделение по функциональному назначению подсистем, составляющих основную систему. 4.Определение информационных особенностей и оценок ее эффективности. 5.Формулировка требований пользователей ИИУС ТТА к ее эффективности и качеству.	Разрабатываются проектные решения, уточняющие и реализующие техническую концепцию ИИУС ТТА. При этом выполняется: 1. Построение интегрированного графа технологии интеллектуализации синтеза; 2.Определение комплекса технических и программно - аппаратных средств, на базе которого реализуется ИИУС ТТА. 3.Построение оптимальной структуры алгоритмического и программного обеспечения ИИУС ТТА. 4. Построение информационных потоков и связей подсистем. 5.Построение функциональных программных модулей. 6. Разработка логической и физической структуры базы данных; построение базы знаний.	Реализуются решения задачи построения ИИУС ТТА. При этом выполняется: 1.Разработка программных и аппаратных модулей ИИУС ТТА, которые реализуют полученные алгоритмы; 2. Реализация методов анализа синтеза и имитационного моделирования ИИУС ТТА; 3.Обработка результатов тестирования; 4.Разработка документации на ИИУС ТТА.

Типизация проектных решений проводится согласно этапам 1–8 предложенной методологии построения ИИУС ТТА [16].

Результатом типизации является синтез проектных решений, приводящий к заданному множеству типовых подсистем и функциональных модулей ИИУС ТТА, совместно выполняющих множество функций на множестве выбранных объектов с требуемой эффективностью и с учетом их индивидуальных особенностей.

Наиболее универсальными общесистемными критериями, позволяющими оценить качество проектных решений, являются минимум приведенной стоимости разработки, отладки и эксплуатации ИИУС ТТА и общее время разработки и отладки программного и информационного обеспечения [144]. В качестве цели проектирования целесообразно выбрать обеспечение гарантированного минимума затрат любого вида.

2.4 Задачи управления процессами, решаемые на множестве состояний функционирования тепло-технологических аппаратов

В ИИУС ТТА будем различать две задачи управления: самим тепло-технологическим процессом ТТА – режим «Процесс», и динамическими режимами объектов, входящих в ТТА, – режим «Пуск».

В общем виде задачу управлением тепло-технологическим процессом формулируют в следующем виде [15]. Должны быть заданы:

– оператор f, задающий связь между значениями компонент вектора выходных переменных $\vec{y} = (y_1,...,y_G)^T$ и значениями векторов управляющих $\vec{u} = (u_1,...,u_D)^T$ и возмущающих воздействий $\vec{x} = (x_1,...,x_P)^T$ для различных состояний функционирования

$$\mathcal{H} = \{h_l(\cdot),\ l = \overline{1,L}\}, \tag{2.1}$$

Для оператора f имеем:

$$f : \mathcal{U} \times \mathcal{X} \times \mathcal{H} \to \mathcal{Y}, \tag{2.2}$$

здесь соответственно множество $\mathcal{U}$ управляющих воздействий, $\mathcal{X}$ – множество возмущений, множество $\mathcal{Y}$ значений выходных переменных, $\mathcal{H}$ – изменений состояний функционирования, l – номер состояния функционирования, L – количество возможных состояний функционирования, для векторов $\vec{y}$, $\vec{u}$, $\vec{x}$ через G, D, P обозначены их размерности;

– условия, которым должны удовлетворять возможные значения выходных переменных y и управляющие воздействия u:

$$y_g \in Y_g^{\text{доп}}, \ g = \overline{1, G}; \tag{2.3}$$

$$u_d \in U_d^{\text{доп}}, \ d = \overline{1, D}, \tag{2.4}$$

где, соответственно, $Y_g^{\text{доп}}$, $U_d^{\text{доп}}$ – области допустимых значений переменных y_g, u_d;

– минимизируемый функционал, характеризующий потери качества выпускаемой продукции и производительности тепло-технологического процесса (1.3).

Требуется определить такие значения управляющих воздействий u_d^*, при которых выполняются ограничения (2.3), (2.4), и критерий (2.5) достигает минимального значения [15].

Существуют различные стратегии способа реализации энерго- или ресурсосберегающего управления в управляющее воздействие в динамических режимах. Наиболее известны две стратегии реализации управляющих воздействий: программная (Пр), при которой решается задача определения оптимальной программы изменения управления, т.е.

$$u^*(\cdot) = \left(u^*(t), \ t \in [t_0, t_к]\right), \tag{2.6}$$

и позиционная (Пз), при которой решается задача определения синтезирующей функции

$$u^*(t) = s\left(z(t), \ t_к - t\right), \tag{2.7}$$

для управляющих систем, использующих обратную связь. Здесь в каждый момент синтезированное управление вычисляется по текущим значениям фазовых координат и оставшегося времени управления [184].

Стратегии реализации управления и соответствующие им системы связаны с представлением динамических процессов, описанных на МСФ. При реализации управления на интервале времени $[t_0, t_к]$ значения переменной, описывающей состояние функционирования $h \in \mathcal{H}_h$, может меняться. Эти изменения могут происходить как за счет изменения значений компонент массива R реквизитов задачи: параметров модели процесса, фазовых координат, границ области управления, временного диапазона; так и за счет изменения самой задачи: изменения вида минимизируемого функционала, введения дополнительных ограничений и т.д. Характер используемой управляющим устройством информации о значении $h(t)$, $t \in [t_0, t_к]$ состояния функционирования определяет различные виды стратегий управления [180].

Некорректируемая программная стратегия $S_{\text{пр.нк.}}$ на множестве $\mathcal{H}_h$ характеризуется тем, что рассчитанная к моменту времени t_0 при состоянии функционирования $h(t_0) = h_0$ оптимальная программа $u^*(\cdot) = (u^*(t), t \in [t_0, t_к])$ постоянна для всех значений h на временном интервале $[t_0, t_к]$. В этом случае по данным массива исходных данных $R(h_0)$ управляющее устройство (УУ) вычисляет оптимальную программу $u^*(\cdot)$ реализации управляющих воздействий на процессы, протекающие в исследуемой системе. Эта стратегия может применяться в случае, незначительного влияния дестабилизирующих факторов на фазовые координаты, или при малой вероятности изменения состояния функционирования на интервале управления $[t_0, t_к]$ [180].

Корректируемая программная стратегия $S_{\text{пр.к.}}$ на множестве $\mathcal{H}_h$, при которой оптимальная программа $u^*(t)$ пересчитывается при каждом изменении $h(t)$, $t \in [t_0, t_к]$, а, следовательно, и всего массива реквизитов R. Системы

управления, использующие стратегию $S_{\text{пр.к.}}$, должны иметь устройства идентификации значений $h(t)$ [180].

По аналогии с $S_{\text{пр.нк.}}$ и $S_{\text{пр.к.}}$ вводятся позиционные некорректируемая ($S_{\text{пз.нк.}}$) и корректируемая ($S_{\text{пз.к.}}$) стратегии. Стратегии $S_{\text{пз.нк.}}$ и $S_{\text{пз.к.}}$ отличаются от описанных выше наличием обратной связи по вектору фазовых координат z. Использование данных стратегий целесообразно при существенном влиянии на исследуемый процесс дестабилизирующих факторов, действующих по каналам измерения и управления, но при редкой смене состояний функционирования. Системы, в которых реализуются позиционные стратегии, обычно называются оптимальными регуляторами [180].

Кроме описанных могут применяться и комбинированные стратегии $S_{\text{км}}$, при которых вначале временного интервала применяется одна стратегия, например, программная $S_{\text{пр}}$, а в другой части интервала времени она «переключается» на позиционную $S_{\text{пз}}$. Системы управления, использующие комбинированные стратегии, позволяют учитывать не только влияние дестабилизирующих факторов, но и изменение состояния функционирования h [180].

В ИИУС ТТА также могут применяться и другие известные стратегии: программная стратегия с автоматическим регулятором, позволяющая устранять отклонения от оптимальной траектории $y^{*}(\cdot)$ выходной переменной; позиционная стратегия, применяющая прогноз изменения фазовых координат, и другие [116, 173, 91, 242].

Программная стратегия с автоматическим регулятором применяется для управления процессами в тех случаях, когда управляющие устройства позволяют находить оптимальную траекторию изменения фазовых координат, что служит основой работы автоматического регулятора [180].

При построении ИИУС для конкретного ТТА из базы знаний исследовательского прототипа производится выбор наиболее подходящей стратегии реализации управляющего воздействия.

Постановки ЗОУ зависят от стратегии. Модель динамики, при программной стратегии, записывается в непрерывной форме, а при позиционной в дискретной.

Постановку ЗОУ динамическими режимами «Пуск» объектов ТТА на МСФ в обобщенном виде можно представить следующим образом. Задаются:

– модели динамики объекта на МСФ M_h:

$$\dot{z} = f_1(A,B,z,u,h,t), \tag{2.8}$$

где A, B – матрицы параметров модели процесса, z – вектор фазовых координат, u – вектор управляющих воздействий, $h \in \mathcal{H}$ – переменная, описывающая состояние функционирования;

– ограничения на изменение фазовых координат, управляющих воздействий и минимизируемый функционал J:

$$z(t_{0h}) = z_h^0 \rightarrow z(t_{kh}) = z_h^k, \tag{2.9}$$

$$\forall t \in [t_{0h}, t_{kh}]: \; u(t/h) \in [u_{\text{нh}}, u_{\text{вh}}], \tag{2.10}$$

$$J = \int_{t_0 h}^{t_{kh}} g\left(t, z(t/h), u(t/h)\right)dt \rightarrow \min_u . \tag{2.11}$$

где z_h^0 и z_h^k – начальное и конечное состояния фазового вектора, $u_{\text{нh}}$, $u_{\text{вh}}$ – границы управления, $t_{0h}, t_{\text{кh}}$ – границы временного интервала;

– массив реквизитов

$$\Re = \{ A, B, z_{0h}, z_{кh}, u_{нh}, u_{вh}, t_{0h}, t_{кh}, h \}.$$

Систему, задаваемую моделью (2.8) для текущего состояния функционирования h, необходимо перевести за фиксированный интервал времени из исходного состояния z_{0h} в конечное состояние $z_{кh}$ при имеющемся ограничении (2.10) на управляющее воздействие при этом, минимизируя функционал (2.11) [43].

Найти решение задачи (2.8)–(2.11) – это значит, для заданного массива $\Re$ исходных данных, найти вид функции управления $u^*(t/h), t \in [t_0, t_{\text{к}}]$, 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" $J_т = \int_{t_{0h}}^{t_{кh}} |u(t/h)| dt \to \min_u$ или функционал "затраты энергии" $J_э = \int_{t_{0h}}^{t_{кh}} u^2(t/h) dt \to \min_u$ (см. работы автора [23, 43]).

Наиболее часто рассматриваются три случая представления основных уравнений изменения переменных системы управления при наличии ДФ. В первом случае ($j=1$) присутствуют помехи по каналу управления и коэффициенты наличия помех $\hbar = 0, \wp = 1$. При $j=2$ имеем $\hbar = 1, \wp = 0$, т.е. присутствуют помехи по каналу измерения, и в случае $j=3, \hbar = 1, \wp = 1$ – помехи по каналам управления и измерения [28, 229, 85].

Модель динамики объекта $M_{hj}, j = 1,2,3$ в дискретной форме задается в виде уравнений состояния и наблюдения

$$M_{hj}: z_{i+1} = Fz_i + Gu_i,\ y_i = Qz_i + \hbar v_i,\ u_i = L_i(R_{jh}) y_i + \wp w_i,$$
$$i = \overline{0, N-1},\ R_{jh} \in \mathcal{R}_j \qquad (2.12)$$

Требуется перевести объект за фиксированное количество шагов N из исходного состояния в конечную область χ

$$z_0 = z^0,\ z_N \in \chi = [z_н^к; z_в^к], \qquad (2.13)$$

при ограничении на управляющее воздействие на каждом шаге

$$\forall\, i \in [0, N-1],\ u_i \in [u_н, u_в], \qquad (2.14)$$

с минимумом функционала в зависимости от объекта управления

$$J = \delta t \sum_{i=0}^{N-1} g(t, z(t/h), u(t/h)) \to \min_u\ . \qquad (2.15)$$

Здесь z_i, u_i, y_i – значения векторов фазовых координат, управляющих воздействий, выходных переменных, w_i, v_i – помехи в каналах управления и измерения с нулевыми средними и среднеквадратическими отклонениями σ_w и

σ_v соответственно, F, G, Q – параметры модели динамики объекта; $L_i(R_{jh})$ – оператор синтеза управляющего воздействия, g – функция управляющего воздействия, $u_н, u_в$ – границы интервала принадлежности функции g, z^0 – начальное значение вектора фазовых координат , $\chi = [z_н^к; z_в^к]$ – конечная область, в которую необходимо перевести систему; N – число шагов на временном интервале управления $[t_0; t_к]$, δt – шаг дискретизации времени. Множество массивов исходных данных (реквизитов) для численного решения задачи (10) – (13) имеет вид

$$\mathcal{R} = \{R_{jh}(F, G, Q, u_н, u_в, z^0, z_н^к, z_в^к, t_0, t_k, \delta t, \sigma_w, \sigma_v)_h\}, \; j = 1,2,3. \quad (2.16)$$

В общем виде постановка ЗОУ динамическими режимами объектов ИИУС включает модель динамики процесса M_h, минимизируемый функционал F, а также стратегию реализации управляющих воздействий C, и особенности задачи управления O. Формально рассмотренные ЗОУ представляют собой кортеж четырех символов $K = < M_h, F, C, O >$, где $M_h \in \mathcal{M}$, $F \in \mathcal{F}$, $C \in \mathcal{C}$, $O \in \mathcal{O}$, а $\mathcal{M}, \mathcal{F}, \mathcal{C}, \mathcal{O}$ – соответственно множества моделей объектов (например, (2.8),(2.12) и.др.), видов функционала ((1.1)–(1.3), (1.12)–(1.14)), стратегий реализации оптимального управления ((2.6), (2.7)и др.) и особенностей задачи ((1.4)–(1.7), (1.9)–(1.11), (1.15)) соответственно. Важной задачей анализа ИИУС ТТА является построение модели предметной области [16].

Таким образом, из всего вышесказанного можно дать определение ИИУС ТТА.

Определение 2.1. ИИУС ТТА – совокупность технических, программных и информационных средств, обеспечивающая решение задач анализа и синтеза управления режимами работы объектов составляющих ТТА [16].

2.5 Задача робастного управления динамическими режимами

Важным свойством систем энерго- или ресурсосберегающего управления является робастность. Робастными принято считать системы, обладающие

высокой эффективностью при номинальных условиях функционирования и приемлемой эффективностью при отклонении от номинальных условий в заданных допустимых пределах [190]. ДФ, действующие по каналам управления (колебание напряжения электросети, погрешности устройств управления и т.д.), и измерения (погрешности идентификации параметров объекта, устройств измерения и т.д.), оказывают влияние на отклонение от номинальных условий функционирования системы. В частности, действие ДФ приводит к изменению значений одного или нескольких параметров в математической модели, описывающей динамические режимы нагрева энергоемкого тепло-технологического оборудования. Такие ДФ называют параметрическими или параметрическими возмущениями. Параметрические возмущения оказывают влияние на существование решения задачи энергосберегающего управления. Поэтому при отклонении параметров модели в заданных допустимых пределах требуется за счет изменений некоторых ограничений задачи гарантированно получать решение ЗОУ.

В общем случае ЗОУ можно сформулировать следующим образом. Динамические режимы нагрева энергоемкого технологического оборудования описываются системой дифференциальных уравнений с разрывной правой частью:

$$\dot{z} = \begin{cases} a_1 z(t) + b_1 u(t), & z \in [z_0^l = z_0, z_1^l) \;\&\; t \in [t_0, t_1^s = t_1 + t_1^r); \\ a_2 z(t) + b_2 u(t), & z \in [z_1^l, z_2^l) \;\&\; t \in [t_1^s, t_2^s = t_2 + t_2^r); \\ \ldots & \ldots \\ a_m z(t) + b_m u(t), & z \in [z_{m-1}^l, z_m^l = z_k] \;\&\; t \in [t_{m-1}^s, t_m^s = t_{m-1} + t_{m-1}^r = t_k]. \end{cases} \quad (2.17)$$

Объект управления необходимо перевести из начального состояния в конечное

$$z(t_0) = z_0 \to z(t_k) = z_k \in \chi^k; \quad (2.18)$$

при фиксированном временном интервале

$$t \in [t_0, t_k], \quad (2.19)$$

ограничении на управляющее воздействие

$$\forall t \in [t_0, t_k]: \; u(t) \in [u_{low}, u_{high}]; \tag{2.20}$$

и лимите энергии

$$\int_{t_0}^{t_k} u^2(t)dt \le \bar{I}_p. \tag{2.21}$$

с минимумом функционала

$$J = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t)dt \to \min. \tag{2.22}$$

Здесь a_i, b_i, $i = \overline{1,m}$ – векторы параметров модели для i-ой зоны; $z(t)$ – вектор фазовых координат; $u(t)$ – управляющее воздействие; z_i^l – границы зон линеаризации; t_i – границы временного интервала i-ой зоны; t_i^r – время, необходимое для обеспечения робастности управления; t_i^s – расширенные границы временного интервала; $[t_0, t_k]$ – временной интервал управления; $[u_{low}, u_{high}]$ – ограничение на управляющее воздействие; J – минимизируемый функционал, I_p - допустимое значение функционала.

Необходимо найти:

– оптимальную управляющую программу

$$u^*(\bullet) = (u^*(t), t \in [t_0, t_k]),$$

– траекторию изменения фазовых координат при этой программе

$$z^*(\bullet) = (z^*(t), t \in [t_0, t_k] / u^*(t)),$$

– и значение функционала затрат.

При решении задачи управления необходимо задание массива исходных данных:

$$\tilde{\tilde{R}} = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_m \end{pmatrix} = \begin{cases} (a_1, b_1, z_0, z_1, u_{low}, u_{high}, t_0, t_1); \\ (a_2, b_2, z_1, z_2, u_{low}, u_{high}, t_1, t_2); \\ \dots \\ (a_n, b_n, z_{n-`}, z_k, u_{low}, u_{high}, t_{n-1}, t_k). \end{cases}$$

В сформулированной ЗОУ можно выделить два вида ограничений: строгие, которые нельзя нарушать, и нестрогие. Например, при оптимальном управлении процессами нагрева нарушение нестрогих ограничений приводит к увеличению времени вывода объекта на заданный режим (2.19) (в некоторых случаях для достижения цели управления расширяется временной интервал управления и, конечное значение фазовой координаты представляется в виде допустимой области $\chi^{к}$) и превышению лимита энергии (2.21), а несоблюдение строгих ограничений (2.18), (2.20),может привести к нарушению технологического регламента и браку, что является недопустимым.

В зависимости от ситуации предлагается менять и основную цель решения ЗОУ – перевод объекта из начального состояния в конечное с минимумом затрат энергии при соблюдении строгих ограничений. В качестве дополнительных целей могут рассматриваться следующие: непревышение лимита энергии, вывод объекта на заданный режим за фиксированный временной интервал и т.д.

Определение 2.2. Под робастным управлением в ИИУС ТТА будем понимать такое управление, при котором обеспечивается основная цель при соблюдении строгих ограничений за счет отклонения от нестрогих, в зависимости от дополнительной цели и интенсивности параметрических возмущений.

Условие робастности выполняется, если для всех возможных ситуаций основная цель достигается. В качестве критерия робастности можно рассматривать попадание в $\chi^{к}$. За счет ослабления нестрогих ограничений можно добиться того, чтобы при всех параметрических возмущениях существовало решение ЗОУ [45].

Так как, на практике параметры a_i и b_i могут меняться под воздействием ДФ (т.е. представляют собой случайные величины), то целью робастного оптимального управления является обеспечение достижения цели управления при всех возможных значениях параметров за счет увеличения временного интервала управления на время t_i^r. Время, необходимое для обеспечения

робастности управления, рассчитывается при помощи имитационного моделирования на этапе полного анализа ОУ. Решение задачи робастного управления проиллюстрировано на примере решения ЗОУ разогрева печи для термообработки магнитопроводов ТОМ–1. Пример приведен в разделе 7.3.

2.6 Информационная модель предметной области

Важной задачей анализа ИИУС ТТА, является построение информационной модели предметной области. При построении этой модели для формализации задач системы использовался теоретико-множественный подход [16].

Модель предметной области $M_{ПО}$ формально отражает описание типовых сущностей моделей ИИУС ТТА и набор связей между ними:

$$M_{\text{ПО}} = \left(M_{TTA}, M_{ИУПС}, M_{ИИПС}, M_{\text{ИИ}}, S_{св}\right), \tag{2.23}$$

где M_{γ}, $\gamma \in \{TTA, \text{ИУПС}, \text{ИИПС}, \text{ИИ}\}$ – информационные модели представления соответственно: ТТА; информационно-управляющей подсистемы (ИИПС), информационно-измерительной подсистемы (ИУПС), интеллектуального интерфейса (ИИ), $S_{\text{св}}$ – матрица информационных связей между моделями M_{γ}. Модель $M_{\text{ПО}}$ позволяет отразить информационные потоки системы, необходимые для достижения целей управления [16].

Информационная модель ТТА представляет объединение множества моделей объектов $M_{\text{ТТА}} = \bigcup_{\eta} M_{\eta}^{\text{О}}$, формализующих знания об объектах управления составляющих ТТА (см. рис. 1.2), η – номер объекта. Морфологически модель $M_{\eta}^{\text{О}}$ можно представить в виде кортежа:

$$M_{\eta}^{\text{О}} = \langle NO, SF, RR, CU, K \rangle, \tag{2.24}$$

где NO – наименование объекта, SF –класс ЗОУ на МСФ; RR– режим работы, CU – цель управления, K – ЗОУ.

Режим работы $RR \in \mathcal{RR}$, где $\mathcal{RR} = \{RR_\eta | \ \eta = \overline{1,n}\}$ представляет множество режимов работы η-го объекта, n – количество рассматриваемых объектов. Будем считать, что объекты могут функционировать в двух режимах «Пуск» и «Процесс». В режиме «Пуск» решаются ЗОУ динамическими режимами объектов входящих в ТТА, а в режиме «Процесс» – ЗОУ тепло-технологическим процессом.

Цель принадлежит множеству целей $CU \in \mathcal{CU}$, имеющему следующий вид: $\mathcal{CU} = \{En, Fl, Qp, Pr, Tm...\}$, включающему цели: En – затраты энергии, Fl – расход топлива, Qp – качество выпускаемой продукции, Pr – производительность управляемого процесса, Tm – быстродействие и т.д. Для достижения каждой цели минимизируется соответствующий ей функционал F. Для достижения нескольких целей могут использоваться комбинированные функционалы [16].

Задача управления представляется в виде кортежа K, который рассмотрен выше.

Модели информационно-управляющей и информационно-измерительной подсистем можно представить в следующем виде

$$M_{\text{ИУПС}} = \{\mathcal{IE}^{\text{У}}, \mathcal{A}^{\text{У}}, \mathcal{PM}^{\text{У}}, \mathcal{IS}^{\text{У}}, \mathcal{KR}^{\text{У}}, \mathcal{OGR}^{\text{У}}, \mathcal{S}^{\text{У}}\} \tag{2.25}$$

и

$$\mathcal{M}_{\text{ИИПС}} = \{\mathcal{IE}^{\text{И}}, \mathcal{A}^{\text{И}}, \mathcal{PM}^{\text{И}}, \mathcal{IS}^{\text{И}}, \mathcal{KR}^{\text{И}}, \mathcal{OGR}^{\text{И}}, \mathcal{POG}^{\text{И}}, \mathcal{S}^{\text{И}}\} \tag{2.26}$$

соответственно. Они содержат следующие множества:

– информационных элементов

$$\mathcal{IE}^{\text{У}} = \{ IE^{\text{У}}_{\text{ji}} | \ j = \overline{1,d^{\text{У}}}; i = \overline{1,n^{\text{У}}_{\mu}} \}, \tag{2.27}$$

$$\mathcal{IE}^{И} = \{ IE^{\text{И}}_{\text{ji}} | \ j = \overline{1,d^{\text{И}}}; i = \overline{1,n^{\text{И}}_{\mu}} \}, \tag{2.28}$$

здесь $IE^{\text{У}}_{ji}, IE^{\text{И}}_{ji}$ – j-ый информационный элемент i-го алгоритма, $d^{\text{У}}, d^{\text{И}}$ – количество информационных элементов соответствующей подсистемы;

– алгоритмов

$$\mathcal{A}^{У} = \left\{ A_{i\,\mu}^{У} \,\middle|\, i = \overline{1, n_{\mu}^{У}};\ \mu = \overline{1, n^{У}} \right\} \tag{2.29}$$

и

$$\mathcal{A}^{И} = \left\{ A_{i\,\mu}^{И} \,\middle|\, i = \overline{1, n_{\mu}^{И}};\ \mu = \overline{1, n^{И}} \right\}, \tag{2.30}$$

здесь $A_{i\,\mu}^{У}$, $A_{i\,\mu}^{И}$ – i-ый алгоритм соответствующей подсистемы, $n_{\mu}^{У}$, $n_{\mu}^{И}$ – количество алгоритмов в μ-ом модуле соответствующей подсистемы, $n^{У}$, $n^{И}$ – количество используемых функциональных программных модулей;

– функциональных программных модулей

$$\mathcal{PM}^{У} = \left\{ PM_{\mu}^{У} \,\middle|\, \mu = \overline{1, n^{У}} \right\} \tag{2.31}$$

и

$$\mathcal{PM}^{И} = \left\{ PM_{\mu}^{И} \,\middle|\, \mu = \overline{1, n^{И}} \right\} \tag{2.32}$$

каждой подсистемы соответственно, например [40];

– множества технических средств

$$\mathcal{TS}^{У} = \left\{ TS_{t}^{У} \,\middle|\, t = \overline{1, n_{ТС}^{У}} \right\} \tag{2.33}$$

и

$$\mathcal{TS}^{И} = \left\{ TS_{t}^{И} \,\middle|\, t = \overline{1, n_{ТС}^{И}} \right\} \tag{2.34}$$

например, для подсистемы управления: управления, обработки и передачи информации, согласования с объектом и т.д.; для подсистемы измерения: измерений, согласований, обработки и передачи информации и т.д.;

– множества критериев, ограничений и погрешностей технических средств измерений при решении задач построения ИУПС и ИИПС;

$$\mathcal{KR}^{У} = \left\{ KR_{i}^{У} \,\middle|\, i = \overline{1, k^{У}} \right\},\ \mathcal{KR}^{И} = \left\{ KR_{i}^{И} \,\middle|\, i = \overline{1, k^{И}} \right\}, \tag{2.35}$$

и

$$\mathcal{OGR}^{У} = \left\{ OGR_{i}^{У} \,\middle|\, i = 1, o^{У} \right\},\ \mathcal{OGR}^{И} = \left\{ OGR_{i}^{И} \,\middle|\, i = 1, o^{И} \right\}, \tag{2.36}$$

$$\mathcal{POG}^{И} = \{ \mathcal{POG}_{i}^{И} \,|\, i = 1, o^{И} \}.$$

– множества матриц смежности синтезируемой подсистемы

$$\mathcal{S}^{У} = \left\{ s_i^{У} \,\middle|\, i = 1, \gamma^{У} \right\}, \mathcal{S}^{И} = \left\{ s_i^{И} \,\middle|\, i = 1, \gamma^{И} \right\}, \tag{2.37}$$

где $\gamma^{У}, \gamma^{И}$ – количество различных вариантов ИУПС и ИИПС [16].

В случае отсутствия приборов, позволяющих оперативно получать достоверную информацию об управляемом трудно формализуемом процессе (например, оперативной оценки влажности движущегося пастообразного материала в камерах сушильной установки), в качестве ИИПС используется «интеллектуальный датчик» структура модели которого аналогична $M_{\text{ИИПС}}$.

Интеллектуальный интерфейс представляет совокупность технических, программных и информационных средств, обеспечивающих заданному кругу пользователей возможность решения множества задач в интерактивном режиме [144], как на этапе проектирования ИИУС ТТА, так и на этапе ее эксплуатации. Модель

$$M_{\text{ИИ}} = \{\mathcal{DS}, \mathcal{Pol}, \mathcal{IS}\} \tag{2.38}$$

содержит: $\mathcal{DS}$ – множество сценариев диалогов взаимодействия интегрированной программно-технологической среды $IS \in \mathcal{IS}$ ИИУС ТТА с множеством пользователей системы $\mathcal{Pol}$, имеющих различные категории доступа. Сценарий диалога представляет формализованную схему решения задач пользователей.

Множество $\mathcal{IS} = \langle \mathcal{TC}, \mathcal{P}_0 \rangle$ содержит техническое и соответствующее программное обеспечение. Множество программного обеспечения $\mathcal{P}_0 = \mathrm{P}_{\text{sis}} \bigcup \mathrm{P}_{\text{in}} \bigcup \mathrm{P}_{\text{pr}}$ включает программное обеспечение трех видов: системное, инструментальное и прикладное.

Прикладное программное обеспечение P_{pr} для решения каждой из K задач с соответствующим набором J приоритетов (категорий доступа) и имеющимся количеством I инструментальных средств может быть представлено в виде:

$$P_{pr} = \bigcup_{k=1}^{K} \bigcup_{j=1}^{J} \bigcup_{i=1}^{I} p_{ijk},$$

где p_{ijk} – программное обеспечение для решения *k*-ой задачи с *j*-ой категорией доступа с *i*-м инструментальным программным средством.

$\mathcal{TS} = \{TS_{ts}, ts = \overline{1,T}\}$ – совокупность технических средств.

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 ($M_{\text{БД}}$) используется реляционная модель, которая позволяет структурировать необходимую информацию в удобном для хранения, дополнения и использования всеми частями системы виде. Модели баз знаний ($M_{\text{БЗ}}$) поддерживают работу с сетевыми, продукционными и фреймовыми представлениями знаний [16].

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 [16].

Эффективность функционирования ИИУС ТТА зависит от:

– алгоритмизации синтеза управляющих воздействий для различных состояний функционирования и режимов работы;

– достижения точности управления при наличии дестабилизирующих факторов действующих по каналам измерения и управления;

– реализации управляющего воздействия в реальном режиме времени при помощи простых микропроцессорных устройств;

– диагностики работоспособности оборудования;

– принятия решения о выборе измерительной процедуры в случае отказа оборудования и получения достоверных результатов косвенного измерения;

– обеспечения удобных условий эксплуатации системы.

Для повышения эффективного функционирования ИИУС ТТА решаются следующие задачи [98]:

– анализ объектов управления на множестве состояний функционирования для обеспечения максимальной эффективности работы ИИУС ТТА в достижении цели управления;

– построение математических моделей объектов составляющих ТТА, позволяющих в автоматическом режиме реализовать знания по управлению многомерными объектами;

– разработка базы знаний ИИУС ТТА, содержащей теоретические знания экспертов об анализе и синтезе оптимального управления и множество измерительных процедур с учетом отказов оборудования;

– разработка базы данных ИИУС ТТА, содержащей данные об особенностях объектов управления, их моделях, в зависимости от режимов работы и состояний функционирования, о стратегиях и алгоритмах управления, об их параметрах;

– создание процедур автоматического поиска решений, использующих достоверность полученных свидетельств в условиях многомерности пространства и его неопределенности.

Проектируемая ИИУС ТТА должна удовлетворять следующим критериям [98]:

1. Оперативность. Синтез алгоритмов управления и выполнения измерительных процедур в реальном времени.

2. Помехозащищенность. Способность выполнять свои функции с требуемым качеством в условиях воздействия помех. Помехоустойчивость. Снижение влияния действующих по каналам измерения и управления дестабилизирующих факторов при синтезе управляющего воздействия для достижения качества управления.

3. Модульность. Система проектируется на базе современных открытых стандартов и спецификаций на измерительном и управляющем оборудовании. Типовые модули системы создаются инвариантными объектам управления. Модернизация системы возможна за счет установки обновленных модулей программного обеспечения.

4. Распределенность. Обеспечение функционирования системы при удаленном доступе.

5. Открытость. Обеспечение прозрачности и совместимости с функционирующими на модернизируемых объектах программными и техническими средствами.

6. Простота реализации. Использование простых аппаратных решений, поддержанных мощными программными средствами.

7. Расширяемость. Расширение функциональных возможностей ИИУС ТТА и улучшение ее оперативности.

8. Безопасность. Обеспечение раздельного доступа к информации системы для различных категорий ее пользователей.

9. Отказоустойчивость. Способность ИИУС при отказе некоторых элементов не останавливать работу системы, а лишь снижать качество функционирования.

Техническая эффективность работы ИИУС ТТА зависит от технических и аппаратных средств ее реализации и параметров функционирования системы. При этом средства реализации должны удовлетворять следующим требованиям [98].

1. Быстродействие. Имеющая достаточный запас по этому критерию система надежно работает. А в случае нехватки времени на процесс расчета параметров функции управляющего воздействия система переходит в нестабильный режим, когда происходят сбои в работе, и вынужденная задержка управляющего воздействия уже не будет оптимальной.

2. Помехозащищенность. Тепло-технологические процессы могут протекать в условиях действия мощных электромагнитных полей, причем

возможны значимые искажения напряжения из-за включения–выключения энергоемкого технологического оборудования. Помехозащищенность оказывает существенное влияние на качество управления. Для обеспечения помехозащищенности требуется создать защиту от помех по входным цепям различными способами, например с помощью необходимых гальванических развязок, соответствующих фильтров в устройствах связи, схем бесперебойного питания и других.

3. Работоспособность. При различных перепадах напряжения в питающей электрической сети или даже при его отключении в применяемых в ИИУС ТТА микропроцессорных устройствах не должно возникать критических искажений информации, что равнозначно отказу промышленного контроллера. Для обеспечения работоспособности контроллера необходимо применить целый комплекс защитных мер, таких как использование элементов постоянного питания оперативной памяти, создание системы бесперебойного питания всего микропроцессорного устройства.

4. Надежность. Схемное решение должно быть выполнено таким образом, что в случае выхода из строя одного или нескольких элементов ИИУС управляемый объект должен быть переведен на резервные элементы или на традиционное управление.

5. Самодиагностика. При построении ИИУС ТТА должна быть обеспечена возможность оперативного определения и устранения возникающих неисправностей.

Информационная эффективность работы ИИУС ТТА во многом определяется моделью представления данных. При создании баз данных системы предпочтителен выбор реляционной модели представления. Ее преимущество состоит в нормализации форм представления данных, которая позволяет их хранить и использовать, минимизируя дублирование и исключая ошибки обработки, возникающие при сетевых и иерархических способах представления [117, 141].

В настоящее время стандартом информационного моделирования баз данных стала так называемая ER-модель, или модель «сущность-связь», созданная в 1976 г. Ченом. Средства проектирования информационных систем (CASE-средства), как правило, содержат различные инструментальные средства описания данных в нотации этой модели. Также известны методы автоматического преобразования проекта баз данных из нотации ER-модели в даталогическую модель, соответствующую конкретной СУБД [117].

В основе всякой ER-модели лежат некоторые базовые понятия [141]: понятие сущности, задающее некоторый объект, идентифицируемый в рабочей среде интеллектуальной системы. Класс сущностей моделируется класс однотипных объектов. Предполагается наличие в системе множества экземпляров сущности. Объект, заданный через понятие сущности, задается индивидуальным набором атрибутов – свойств, описывающих характеристики сущности данного экземпляра. Ключ – это набор атрибутов, однозначно идентифицирующих конкретный экземпляр сущности.

Построение конкретных моделей, описывающих предметную область, будут рассмотрены в последующих главах.

2.7 Постановка задачи построения системы на этапе технического проектирования

К задачам, возникающим на этапах проектирования, относится задача структурного построения ИИУС ТТА с учетом оптимальности параметров по заданным критериям и ограничениям на характеристики синтезируемых подсистем. Комплекс задач структурного построения ИИУС включает оптимальный выбор следующих составляющих: состава функциональных модулей программного обеспечения; содержания межмодульного интерфейса; технического обеспечения; а также архитектуры ИИУС ТТА, которая

формализуется функциональной схемой, учитывающей заданные технико-экономические характеристики функционирования создаваемой системы [16].

Задача структурного построения проектных решений формулируется следующим образом [16]:

следует (необходимо) найти оптимальное проектное решение архитектуры ИИУС ТТА

$$\gamma^* = \arg\min\{S(\gamma) \mid \gamma \in \Gamma\}, \qquad (2.40)$$

где $\gamma = (M_{\text{ТТА}}, M_{ИУПС}, M_{ИИПС}, M_{ИИ}, M_{БД}, M_{БЗ}, S_{св})$ – вариант архитектуры, Γ – множество вариантов архитектур ИИУС ТТА. В качестве целевой функции предложен критерий приведенных затрат, зависящий от принимаемых проектных решений

$$S(\gamma) = \min(S^{\text{фпм}} + S^{\text{со}} + S^{\text{БД}} + S^{\text{БЗ}} + S^{ДС} + S^{ТС} + S^{Рд} + S^{\text{э}}), \qquad (2.41)$$

где $S(\gamma)$ – общая стоимость, $S^{\text{фпм}}$ – стоимость разработки функциональных программных модулей; $S^{\text{со}}$ – системной отладки; $S^{\text{БД}}$ – создания баз данных; $S^{БЗ}$ – создания баз знаний; $S^{ДС}$ – разработки сценариев диалога; $S^{ТС}$ – технических средств системы; $S^{Рд}$ – программного обеспечения; $S^{\text{э}}$ – приведенная стоимость эксплуатации ИИУС.

Информационные модели вариантов архитектуры включают следующие блоки критериев и ограничений [16].

Для формализации поставленной задачи введем следующие переменные [13]:

$$x^{\text{У}}_{\text{i},\mu} = \begin{cases} 1, A^{\text{У}}_{i\,\mu} \in PM^{\text{У}}_{\mu}; \\ 0, A^{\text{У}}_{i\,\mu} \notin PM^{\text{У}}_{\mu}; \end{cases} \qquad x^{\text{И}}_{i,\mu} = \begin{cases} 1, A^{\text{И}}_{i\,\mu} \in PM^{\text{И}}_{\mu}; \\ 0, A^{\text{И}}_{i\,\mu} \notin PM^{\text{И}}_{\mu}; \end{cases} \qquad (2.42)$$

$x^{У}_{i\,\mu}$, $x^{\text{И}}_{i,\mu}$ – массивы принадлежности i-го алгоритма μ-му модулю соответствующих подсистем;

$$y^{\text{У}}_{\text{j,i}} = \begin{cases} 1, IE^{\text{У}}_{\text{j,i}} \in A^{\text{У}}_{i\,\mu}; \\ 0, IE^{\text{У}}_{\text{j,i}} \notin A^{\text{У}}_{i\,\mu}; \end{cases} \qquad y^{\text{И}}_{j,i} = \begin{cases} 1, IE^{\text{И}}_{j,i} \in A^{\text{И}}_{i\,\mu}; \\ 0, IE^{\text{И}}_{j,i} \notin A^{\text{И}}_{i\,\mu}; \end{cases} \qquad (2.43)$$

$y^{У}_{j,i}$, $y^{И}_{j,i}$ – массивы принадлежности j-го информационного элемента i-му алгоритму соответствующих подсистем;

$$z^{У}_{\mu,j} = \begin{cases} 1, \sum\limits_{i}^{n^{У}_{m}} x^{У}_{i\mu} y^{У}_{j,i} \geq 1; \\ 0, 0 < \sum\limits_{i}^{n^{У}_{m}} x^{У}_{i\mu} y^{У}_{ji} < 1; \end{cases} \qquad z^{И}_{\mu,j} = \begin{cases} 1, \sum\limits_{i}^{n^{И}_{\mu}} x^{И}_{i\mu} y^{И}_{j,i} \geq 1; \\ 0, 0 < \sum\limits_{i}^{n^{И}_{\mu}} x^{И}_{i\mu} y^{И}_{ji} < 1; \end{cases} \tag{2.44}$$

$z^{У}_{\mu,j}$ $z^{И}_{\mu,j}$ – массивы взаимосвязи модулей с информационными элементами.

При нахождении оптимального проектного решения архитектуры ИИУС требуется минимизировать общий объем занимаемой памяти. Структуру функциональных программных модулей проектируют таким образом, чтобы объем оперативной $V_i^{оп}$ и постоянной памяти $V_i^{пп}$ при работе i алгоритма был минимальным [16, 13]

$$V = \sum_{i}^{n^{У}_{\mu}+n^{И}_{\mu}} V_i^{п} = \sum_{i}^{n^{У}_{\mu}+n^{И}_{\mu}} \left(V_i^{пп} + V_i^{оп} \right) \to \min, \tag{2.45}$$

где V – суммарный объем памяти.

Этот критерий может достигать минимального значения в случае выполнения следующих ограничений:

– на полноту информации или общее число алгоритмов в составе синтезируемого функционального программного модуля

$$\sum_{i=1}^{n^{У}_{\mu}} x^{У}_{i,\mu} \leq N^{У}_{\mu} \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^{n^{И}_{\mu}} x^{И}_{i,\mu} \leq N^{И}_{\mu}, \tag{2.46}$$

где $N^{У}_{\mu}$, $N^{И}_{\mu}$ – максимально допустимое количество алгоритмов в модулях, определяется согласно подмножествам $\mathcal{H}_В$ наиболее вероятных и $\mathcal{H}_К$ критических состояний функционирования конкретного ТТА;

– на однократность включения алгоритма в программные модули

$$\sum_{\mu=1}^{n^{У}} x^{У}_{i,\mu} = 1 \quad \text{и} \quad \sum_{\mu=1}^{n^{И}} x^{И}_{i,\mu} = 1; \tag{2.47}$$

– на дублирование занимаемой памяти информационными элементами в различных алгоритмах:

$$\sum_{i=1}^{n_\mu^{У}} y_{ji}^{У} = 1; \qquad (2.48)$$

– на сложность информационного интерфейса между отдельными модулями

$$\sum_{j}^{d^{У}} \sum_{\mu=1}^{n^{У}-1} \sum_{\mu'=\mu+1}^{n^{У}} z_{\mu j}^{У} z_{\mu' j}^{У} \le D^{У}, \qquad \sum_{j}^{d^{И}} \sum_{\mu=1}^{n^{И}-1} \sum_{\mu'=\mu+1}^{n^{И}} z_{\mu j}^{И} z_{\mu' j}^{И} \le D^{И}, \qquad (2.49)$$

где $D^{У}, D^{И}$ – максимально допустимые интерфейсы между модулями подсистем (допустимое число переменных, являющихся общими для модулей).

При подборе технических средств минимизируется суммарный критерий

$$\sum_{ts}^{n_{ТС}^{У}} q_{ts}^{У} = \sum_{ts}^{n_{ТС}^{У}} \frac{S_{ts}^{ТС}}{P_{ts}^{ТС}} \to \min \quad \text{и} \quad \sum_{ts}^{n_{ТС}^{И}} q_{ts}^{И} = \sum_{ts}^{n_{ТС}^{И}} \frac{S_{ts}^{ТС}}{P_{ts}^{ТС}} \to \min, \qquad (2.50)$$

где $q_{ts}^{У}, q_{ts}^{И}$ – суммарные критерии подбора технических средств, $S_{ts}^{ТС}$, $P_{ts}^{ТС}$ – стоимость и критерий пригодности использования ts-го технического средства.

Критерий минимизации сложности системы может быть записан в следующем виде

$$\dim S_{св} = \sum_i \sum_j s_{ij}, \qquad \dim S_{св} \to \min. \qquad (2.51)$$

Так же минимизируется критерий количества технических средств обоих подсистем

$$n_{ТС}^{У} + n_{ТС}^{И} \to \min. \qquad (2.52)$$

Решение задач структурного синтеза предлагается осуществлять с использованием эволюционных методов в частности генетических алгоритмов.

Подход к формализации и автоматизации этапов синтеза на этапе функционирования типовых оптимальных информационно-управляющих систем режимами работы ТТА базируется на разработанных формализованных процедурах анализа и синтеза оптимального управления. В результате детального анализа предметной области выделяются общие и специфические части, по которым строится интегрированный граф технологии (рис.2.1), являющийся

основой интеллектуального синтеза решений задач оптимального управления на базе типовых программных и информационных модулей, обеспечивающих решение заданного множества задач оптимального управления различным оборудованием ТТА и построения ИИУС ТТА [16].

2.8 Интегрированный граф метода алгоритмизации синтеза решения задач управления режимами тепло-технологических аппаратов, использующий фреймы знаний

Анализу и синтезу систем автоматического управления, с применением, в качестве основного математического аппарата раздела комбинаторной топологии – линейных направленных графов, которые обладают двумя важными свойствами: наглядностью и экономией в вычислениях, посвящены следующие работы. Использование графического представления системы линейных дифференциальных уравнений для решения задач анализа и синтеза – работа академика Б.П. Петрова. В ней предложены две формы представления уравнений – схемная и графная – получившие дальнейшее развитие в виде структурных схем направленных графов. Первая форма представления (схемная) легла в основу направления анализа динамических систем, получившего название структурных методов представленная в работах Шаталова А.С., Кузовкина Н.Т., Сучилина А.М. и др. Вторая форма (графная) не получила такого широкого применения, хотя успешно использовалась в структурных исследованиях Гальперина И.И. и др. В работе Т.М. Райцына рассматривается возможность использования направленных графов для решения задач синтеза линейных систем автоматического управления [225]. Однако в перечисленных работах не приводятся решения задач управления тепло-технологическими процессами ТТА.

Для решения этой проблемы предлагается метод (описанный в работе автора [43]) построения интегрированного графа алгоритмизации синтеза решения задачи управления процессами ТТА. Вершины графа располагаются на

различных уровнях абстракции – стратах. Каждый уровень характеризуется своим набором законов и принципов, которые описывают поведение разрабатываемой системы. Для эффективности такого иерархического описания необходима независимость моделей различных уровней системы. Отличием этой концепции иерархии от других является введение так называемой стратифицированной системы. Уровни абстракции, включающие стратифицированное описание называются стратами [172].

Целью решения задачи алгоритмизации синтеза является получение управления процессами ТТА, минимизирующего заданные функционалы. Введение страт позволяет выделить типовые этапы решения задач синтеза управления, и за счет рассмотрения лишь альтернативных путей найти более оптимальные алгоритмы поиска решений на графе пространства состояний [13, 16].

Технология метода отражает представление множества задач алгоритмизации синтеза управления ТТА в пространстве состояний [43]. В пространстве состояний вершины графа соответствуют состояниям решения задач и представляют собой фреймы знаний [16], оперирование которыми реализуется с использованием алгоритмов процедур программных модулей. Ребра графа представляют информацию, которая передается и получается в результате функционирования программных модулей. Вершины располагаются на различных уровнях абстракции (стратах) [16, 43].

Граф содержит страту целей, определяемых режимами работы объектов, составляющих ТТА. Цели соответствуют минимизируемым функционалам, которые в свою очередь определяют решаемую задачу. Поиск в пространстве состояний характеризует решение конкретной задачи как процесс нахождения пути на графе, являющегося конкретным алгоритмом.

Интегрированный граф технологии (рис.2.1) содержит следующие страты: информационной модели всего ТТА, информационных моделей технологического оборудования, классов задач на МСФ, режимов работы, целей

управления, математических моделей объектов, стратегий управления, особенностей задач, анализа и синтеза [43].

При функционировании исследовательского прототипа ИИУС ТТА передача информации между пользователями, базами данных активными процедурами осуществляется посредствам диалогов интеллектуального интерфейса, имеющего в своем составе экспертную систему «Энергосберегающее управление динамическими объектами» [186, 268, 37, 202].

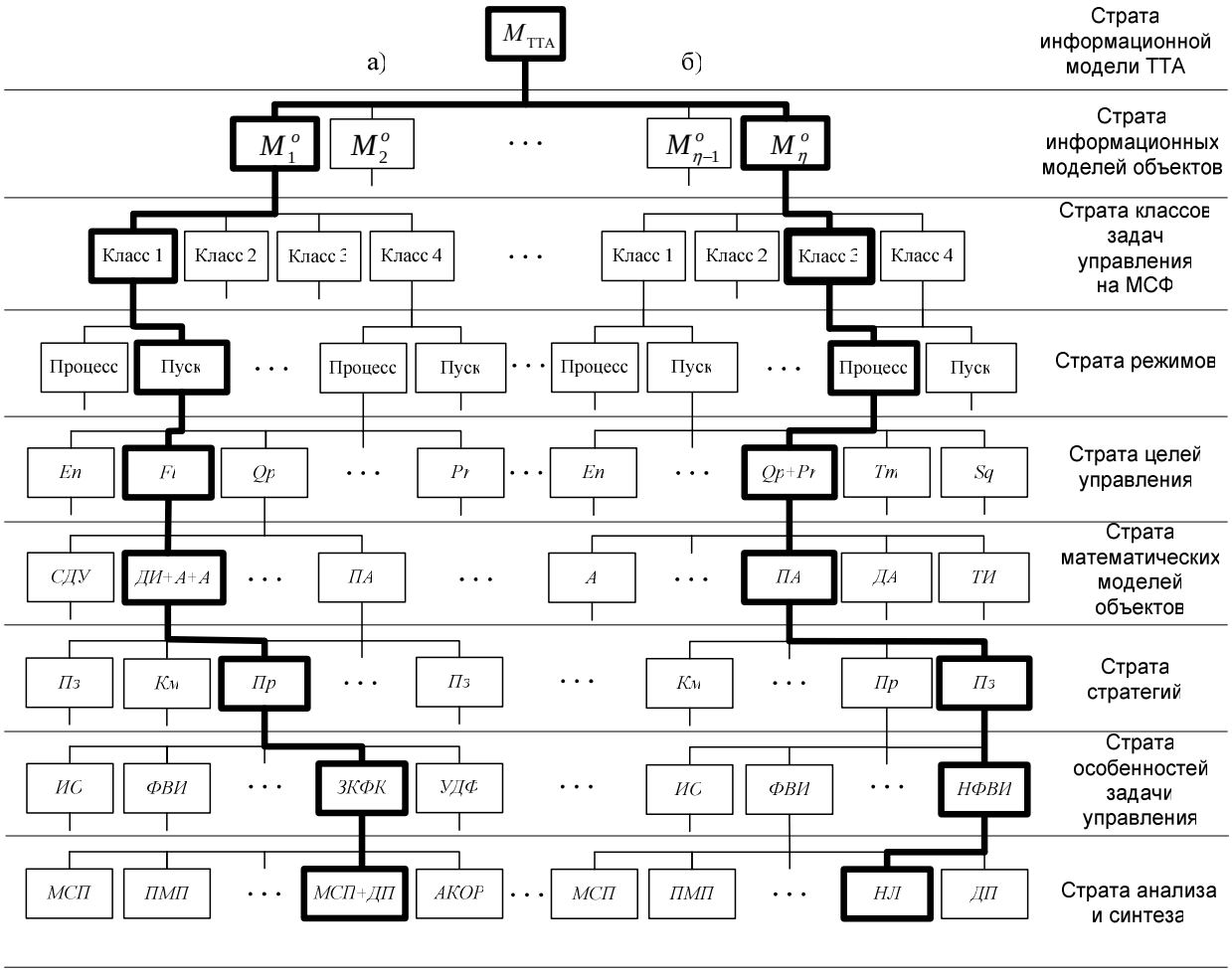


Рисунок 2.1 Интегрированный граф метода алгоритмизации синтеза управляющих воздействий режимами ТТА: а) Синтез решения для режима «Пуск»; б) Синтез решения для режима «Процесс».

Верхние страты предназначены для идентификации информационных моделей ТТА и его технологического оборудования. Процедуры модулей,

принадлежащих страте информационной модели всего ТТА и страте информационных моделей объектов управления, задают различные сценарии диалога системы с пользователем. В результате выполнения этих сценариев извлекается необходимая информация об объекте управления в виде морфологической модели M_{η}^{o}, хранимой в базе данных [16].

Цель принадлежит множеству целей: затраты энергии, расход топлива, качество выпускаемой продукции, производительность управляемого процесса, быстродействие и т.д. Для достижения каждой цели минимизируется соответствующий ей функционал. Для достижения нескольких целей могут использоваться комбинированные функционалы.

Страта классов задач управления на МСФ дает возможность при описании моделей объекта рассматривать условия работы объекта с комплексным учетом воздействия внешнего окружения и другими факторами имеющими детерминированную, вероятностную или нечеткую (расплывчатую) природу. Изменение h происходит в случайные моменты времени. В зависимости от изменения h на интервале времени управления и идентификации значений h выделяют четыре класса задач управления на МСФ [185, 31, 32, 43].

Страта режимов и страта целей служат для определения функционала, задающего конкретную цель управления. Смена режима работы объекта управления меняет цель управления (см. рис. 1.2). Так, например, в режиме «Пуск» в ТТА может не быть загрузки материала, поэтому решать задачу повышения его качества на данном этапе бессмысленно.

Страта моделей служит для идентификации математической модели объекта, подходящей для решения задачи алгоритмизации синтеза управления. При этом фреймы модулей идентификации дают возможность, с учетом полученных экспериментальных данных, подобрать наиболее перспективную модель объекта управления из множества альтернативных адекватных моделей (см. методику оперативной идентификации моделей динамики, глава 3). Модели могут быть представлены в виде: ДУ – систем дифференциальных уравнений в частных производных с граничными условиями; ПА – процедурно-аналитических

моделей (нейронные сети, модели с нечеткой логикой и т.д.); А – инерционный объект первого порядка (апериодическое звено), ДА – двойного апериодического звена, ДИ – двойного интегратора; ТИ – тройного интегратора; а также многозонных моделей т.е. систем дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, например, ДА+ДА, ДИ+А+А и т.д. [90, 48, 31, 41, 33, 130, 35].

Страта стратегий предлагает следующие стратегии реализации оптимального управления: S_{AP} – корректируемую стратегию управления или стратегию с применением нечеткой логики (Кр), $S_{\text{пр}}$ – программную (Пр), $S_{\text{пз}}$ – позиционную (Пз), $S_{\text{комб}}$ – комбинированные стратегии управления (Км), $S_{\text{ФК}}$ – с фильтром Калмана (ФК) $S_{\text{ПМ}}$ – прогнозирующей моделью (ПМ); и их разновидности [21, 85].

Страта особенностей содержит фреймы, 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 ДФ (УДФ) и т.д. [42, 38, 18, 25, 27, 28, 29, 85, 187, 30, 14].

Страта анализа и синтеза содержит процедуры реализации методов: синтезирующих переменных (МСП), принципа максимума Понтрягина (ПМП), аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), динамического программирования (ДП), комбинированных (МСП+ДП), нечеткой логики (НЛ) и т.д.[84, 86, 15, 41].

Важнейшими компонентами системы, использующими интегрированный граф технологии, являются база знаний (БЗ) и база данных (БД) [220].

БЗ обеспечивает не только рассуждения на основе опыта, но и фундаментальные знания о математических методах анализа и синтеза и знания прикладного характера, используемые разработчиками алгоритмического обеспечения, в том числе математические постановки задач управления, а также соотношения, определяющие виды функций управления для используемых

функционалов, определяющие синтезирующие переменные, используемые при решении задач имитационного моделирования, и др. Эти соотношения применяются при разработке новых моделей на базе принципов наследования.

В БД содержатся сведения о результатах внедрения системы компьютерного оптимального управления, полученный эффект использования синтезированных алгоритмов управления, различные виды моделей процессов, параметры и состав моделей для многозонных объектов, а также используемые стратегии, условия решения задач управления и т.д.

Приведенная технология позволяет оперативно синтезировать решения задач управления без участия лица принимающего решение [16].

Буквами а) и б) на рис.2.1. показаны примеры путей синтеза решения задачи управления, используемые при построении рабочего прототипа ИИУС СВЛ, и более детально рассмотренные в последующих главах работы.

Разработка рабочего прототипа ИИУС ТТА проводится в две стадии. На первой стадии, назовем ее исследовательской, используется персональный компьютер, содержащий полную версию интегрированного графа технологии интеллектуализации синтеза решения задачи управления ТТА (рис.2.1) с полным наполнением страт.

На исследовательской стадии происходит анализ состава ТТА, в результате чего формируется новый интегрированный граф технологии интеллектуализации синтеза решения задачи управления ТТА путем наполнения его страт баз данных и знаний знаниями об исследуемых объектах, составляющих ТТА (например рис. 2.1 а) или б)). Для этого посредством реализованных сценариев диалога с пользователем определяются:

– информационная модель всего ТТА;

– информационные модели объектов его составляющих;

– множество состояний функционирования объекта;

– режимы работы объекта;

– цели управления режимами работы объекта;

– вид математической модели изучаемого процесса и ее параметры, исходя из данных эксперимента;

– действующие по каналам управления и измерения ДФ;

– стратегии управления;

– особенности задачи управления;

– формулировки постановок задач;

– производится анализ и синтез задачи управления.

Результатом исследовательской стадии, является построение нового интегрированного графа технологии интеллектуализации синтеза задачи управления, лежащего в основе функционирования ИИУС ТТА. Построение заключается в определении из общих множеств типовых элементов исходного графа, множества элементов результирующего графа, реализующих решения задач конкретного ТТА. Наряду с построением графа на исследовательской стадии решается задача структурного построения проектных решений, т.е. находится оптимальное проектное решение архитектуры ИИУС ТТА [16].

На второй, назовем ее рабочей стадией, построенный граф технологии интеллектуализации синтеза задачи управления для конкретного исследованного объекта управления (например, установка отжига сердечников ТОМ-1, сушильная установка вальцеленточного типа (СВЛ)) записывается в выбранный для данного проектного решения контроллер, и наличие ПК с полной версией графа перестает быть необходимым. Использование построенного графа технологии интеллектуализации синтеза ЗОУ позволяет оперативно синтезировать решения задач управления без участия лица, принимающего решение.

Выводы по второй главе

1. Сформулированы и обоснованы методологические основы синтеза интеллектуализированных оптимальных информационно-управляющих систем.

Определены этапы методологии и сформулированы задачи построения ИИУС ТТА. Проведена декомпозиция структурного построения ИИУС ТТА на стадии проектирования.

2. Формализованы и сформулированы задачи оптимального управления, решаемые ИИУС ТТА на МСФ в том числе задача робастного управления и задача при наличии ДФ в каналах управления и измерения.

3. Создана информационная модель предметной области, лежащая в основе разрабатываемых баз данных и знаний ИИУС ТТА.

4. Сформулирована задача структурного построения ИИУС ТТА на этапе технического проектирования с использованием технологических критериев и ограничений.

5. Разработан интегрированный граф технологии алгоритмизации синтеза управляющих воздействий. В пространстве состояний вершины графа соответствуют этапам решения задач и представляют собой фреймы знаний, оперирование которыми реализуется с использованием алгоритмов программных модулей. Ребра графа – это информация, передаваемая и получаемая в результате работы модулей. Вершины графа располагаются на различных уровнях абстракции – стратах. Каждый уровень характеризуется рядом особенностей, с помощью которых описывается поведение системы. Введение страт позволяет выделить типовые этапы решения задач синтеза управления, и за счет рассмотрения лишь альтернативных путей найти более оптимальные алгоритмы поиска решений на графе пространства состояний.

6. Разработана технология алгоритмизации синтеза управляющих воздействий на основе созданного интегрированного графа, которая позволит оперативно синтезировать решение задач управления без участия лица, принимающего решение. Поэтому разрабатываемую информационно-управляющую систему, в основе работы которой лежит эта технология, будем называть, интеллектуальной информационно-управляющей системой.

3 МОДЕЛИ И ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Важным при построении ИИУС ТТА является этап моделирования. В результате, которого создаются математические модели динамики объектов и управляемых процессов, информационные модели, а также выбираются модели представления знаний. В главе также изложен подход к идентификации математических моделей, пригодных для решения задач анализа и синтеза ИИУС ТТА, особенностью которого является представление их на МСФ.

3.1 Идентификация математических моделей процессов режима «Пуск» на множестве состояний функционирования

Основу алгоритмизации синтеза энерго- и/или ресурсосберегающего управления представляет идентификация математической модели динамики объекта с учетом его множества состояний функционирования в ходе реальной эксплуатации [18].

Модели объектов в ИИУС ТТА представляются на МСФ [31, 32]. Важным на этапе анализа предметной области является определение $\mathcal{H} = \mathcal{H}^{pp} \times \mathcal{H}^{p}$ – множества состояний функционирования ТТА. Множество состояний функционирования дает возможность при описании моделей объектов рассматривать условия их работы с комплексным учетом воздействия внешней окружающей среды, и другими факторами имеющими детерминированную, вероятностную или нечеткую природу. В качестве факторов, влияющих на изменение состояния функционирования в множестве $\mathcal{H}^{PP}$ – множество режимов работы, можно выделить: $H_i^{пм}, i = \overline{1,n}$ – внутренние, связанные с изменением вида и параметров моделей и внешние, косвенно влияющие на управляющие

воздействия: $H^{кф}$ – изменения качества топливной смеси, давление пара, напряжения и частоты питающей сети т.п. $H^{ос}$ – изменения окружающей среды (температура, влажность, давление и т.д.). Таким образом, множество состояний функционирования режимов работы ТТА можно записать в виде

$$\mathcal{H}^{рр} = H_1^{пм} \times ... \times H_n^{пм} \times H^{кф} \times H^{ос}.$$

Множество состояний работоспособности $\{\mathcal{H}_{вер}, \mathcal{H}_{кр}\} \subset \mathcal{H}^{р}$ содержит наиболее вероятные $\mathcal{H}_{вер}$ и критические состояния $\mathcal{H}_{кр}$ (в случае отказа составных частей оборудования). Значения переменной h, описывающей различные состояния функционирования исследуемого объекта, задается кортежем $h = \langle h^{рр}, h^{р} \rangle$, где $h^{рр} \in \mathcal{H}^{рр}, h^{р} \in \mathcal{H}^{р}$. 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 $h \in \mathcal{H}_{вер}$, и возможные алгоритмы управления при отказе технических средств, т.е. при $h \in \mathcal{H}_{кр}$.

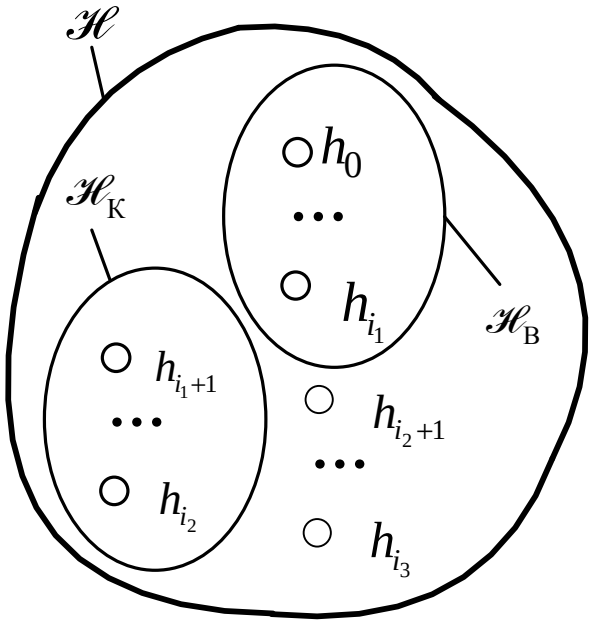


Рисунок 3.1 Множество состояний функционирования ТТА

Итак, математическая модель функционирования ТТА на МСФ в режиме “Пуск” представляет собой множество моделей $\mathcal{M}_h = \left\{ M_{i\,h^p}, i = \overline{1,n},\ h^p \in \mathcal{H} \right\}$, где $h \in \mathcal{H}$ и $M_{i\,h^p}$ есть модель динамики i-го объекта ТТА в состоянии h^p, вид которой зависит от значения $H_i^{пм}, i = \overline{1,n}$. Получаемое на этапе анализа ТТА множество моделей $\mathcal{M}_h$ сохраняется в базе данных ИИУС ТТА [31, 32].

Постановка задачи оперативной идентификации моделей динамики

Важным этапом моделирования ИИУС ТТА является решение задачи оперативной идентификации моделей динамики объектов управления, составляющих ТТА. Идентификация моделей динамики включает в себя получение в ходе эксперимента и уточнение данных модели, описывающих процесс “Пуск” управляемого объекта. Модель, полученная в ходе процесса идентификации, описывается системой дифференциальных уравнений, с разрывной правой частью вариативной структуры, которая позволяет учесть смену состояния функционирования. Известно большое число методов идентификации моделей [58, 167, 252, 267].

Используемые в разработанной ИИУС модели динамики ТТА адекватно описывают физико-химические процессы, протекающие при различных состояниях функционирования, и учитывают их нелинейности. Они удовлетворяют требованию простоты, что позволяет использовать их для синтеза управляющих воздействий в реальном масштабе времени [180].

Модели множества $\mathcal{M}_h$ идентифицируются по следующей методике. Задаются:

– совокупности экспериментальных данных динамики объекта, отражающие связь входных воздействий u и выходных переменных y, т.е.

$$\{u(t_i) = u_i;\ y(t_i) = y_i;\ i = 1,2,...\}; \qquad (3.1)$$

– множество базовых моделей, для которых решены задачи полного анализа на МСФ

$$\mathcal{M}_{\text{hp}} = \{M_j,\ j = 1,2,...\}; \tag{3.2}$$

здесь каждая модель содержит дифференциальное уравнение $\dot{z} = f_j(z,u,t)$ и отображающую функцию

$$\tilde{y}(t) = \phi_j(\tilde{z}(t)); \tag{3.4}$$

– постановка решаемой ЗОУ.

На основе особенностей ЗОУ и функционирования объекта определяются требования к точности и сложности модели.

Требования к точности могут формулироваться в виде удовлетворения условию на допустимую величину ошибки

$$E(t_i) = y(t_i) - \tilde{y}(t_i), \tag{3.5}$$

т.е.

$$\max_{t_i} |E(t_i)| \le E_{\text{доп}} \tag{3.6}$$

или минимума функционала $\mathcal{E}$ от ошибки $E(t)$ при ограничении на сложность модели

$$\mathcal{E} = \int_{t_0}^{t_k} q(E(t))dt \to \min, \tag{3.7}$$

здесь $\tilde{y}$ – расчетное значение y по модели, $E_{\text{доп}}$ – допустимая величина ошибки, q – функция ошибки, обычно квадратичная. Требуется, используя экспериментальные данные и множество моделей, разработать модель объекта

$$M^0 = (f^0, \varphi^0), \tag{3.8}$$

пригодную для синтеза управляющего воздействия в реальном масштабе времени с заданной точностью.

Общая задача идентификации предполагает: идентификацию структуры модели, оценку ее параметров и проверку адекватности на МСФ. Математически задача идентификации структуры формулируется следующим образом. Заданы:

– объект управления, для которого можно получать массив (3.1) экспериментальных данных;

– множество базовых моделей;

$$I_1(y,\tilde{y}) = \max_t |y(t) - \tilde{y}(t)|, \ t \in [0;T]; \tag{3.9}$$

– возможные виды нелинейностей объекта

$$\pi = \{\pi_k, k = 1,2,...\}, \tag{3.10}$$

здесь π_k - нелинейность k-го вида.

Требуется, используя массивы (3.1), множество моделей (3.9) и виды нелинейностей (3.10), определить структуру модели

$$SM = \left(M_j, \pi_k, H_i^{\text{мд}}\right), \tag{3.11}$$

включающую подмножество базовых моделей M_j, учитываемых нелинейностей π_k, и множество состояний функционирования $H_i^{\text{мд}}$.

Структура *SM* считается допустимой, если выполняются условия:

– согласованности экспериментальных и расчетных значений выхода в виде траекторий

$$y(\cdot) = (y(t_i), \ i = 1,2,...)$$

и

$$\tilde{y}(\cdot) = (\tilde{y}(t_i), \ i = 1,2,...),$$

в частности, траектория $\tilde{y}(\cdot)$ должна воспроизводить все особенности траектории $y(\cdot)$ – наличие точек перегиба, изменения крутизны и т.д.;

– учета существенных нелинейностей объекта;

– пригодности для решения ЗОУ;

– физико-химической интерпретируемости вводимого множества $H_i^{\text{мд}}$.

Необходимо отметить, что решением задачи идентификации структуры может быть множество альтернативных структур

$$\mathcal{SM} = \{SM_j,\ j = 1,2,\ldots\}. \qquad (3.12)$$

Общепринятого критерия адекватности структуры SM исследуемому объекту нет, эти критерии могут существенно различаться для различных объектов. Здесь могут использоваться, так называемые, латентные критерии, например, формы оптимальных траекторий $u^*(\cdot)$ и $z^*(\cdot)$, которые должны находить физическое объяснение.

Рассматриваемая задача идентификации предполагает приближенную оценку параметров с использованием функционала

$$I_2 = (y, \tilde{y}) = \int_0^T (y(t) - \tilde{y}(t))^2 dt .$$

Точная оценка параметров модели производится в процессе оценки параметров модели объекта [109].

Оценка параметров модели объекта

Задача оценки параметров модели или задача идентификации в узком смысле математически формулируется следующим образом. Задаются:

– структура модели (3.11) (или множество структур (3.10)), характеризуемая массивом параметров B;

– требования к точности модели на множестве состояний функционирования, например,

$$\forall h \in H_i^{\text{мд}} \quad I_2\left(y, \tilde{y}/h\right) \le \varepsilon_{\text{доп}}(h),$$

$$I_2\left(y, \tilde{y}/h\right) = \max_{t_i} \left| y\left(t_i/h\right) - \tilde{y}\left(t_i/h\right) \right|, \quad t_i \in [t_{0h}, t_{kh}], \qquad (3.13)$$

здесь $y\left(t_i/h\right)$, $\tilde{y}\left(t_i/h\right)$ – экспериментальные и расчетные значения выходной переменной в состоянии h, t_{oh}, t_{kh} - начало и конец временного интервала функционирования в состоянии h;

– критерий оптимальности $I\left(y,\tilde{y}/H_i^{\text{мд}}\right)$ на МСФ $H_i^{\text{мд}}$.

Необходимо определить такие оценки массива параметров $\hat{B}$, которые обеспечивают выполнение требований точности (3.13) для всех $h \in H_i^{\text{мд}}$ и минимизируют критерий $I\left(y,\tilde{y}/H_i^{\text{мд}}\right)$.

Заметим, что массив параметров $\hat{B}$ включает не только параметры дифференциальных уравнений (3.3), но и параметры, характеризующие нелинейности, граничные значения вектора z при состыковке локальных моделей M_j и др.

Проверка адекватности модели

Адекватность создаваемой модели M^0 для использования в разрабатываемой ИИУС заключается не только в удовлетворении требованию точности, но и в том, что модель должна быть пригодной для алгоритмизации синтеза управляющих воздействий в реальном масштабе времени и иметь реализацию простыми техническими устройствами, в частности, она должна удовлетворять требованиям быстродействия и компактности. Кроме этого, модель должна быть устойчива к незначительным изменениям ее параметров.

С учетом этого, задача проверки адекватности математически формулируется следующим образом. Задаются:

– модель объекта $M^0 = \left(f^0, \varphi^0\right)$;

– множество состояний функционирования $\mathcal{H}$;

– диапазон изменения компонентов массива реквизитов ЗОУ, в том числе интервалы возможных значений $z(t_0), z(t_k)$ и др.;

– критерии (условия) адекватности.

Требуется спланировать эксперимент и проверить выполнение условий адекватности.

При проверке адекватности необходимо, во-первых, чтобы использовались экспериментальные значения (x_i, y_j), отличные от тех, которые применялись при оценке параметров, во-вторых, значения (x_i, y_j), должны выбираться из всего диапазона возможных значений исходных данных ЗОУ.

Разновидностью задачи проверки адекватности является выбор наиболее перспективной модели из множества альтернативных.

Для решения задачи идентификации динамики объектов, составляющих ТТА множество базовых моделей (3.2), имеет следующий вид:

{И, А, ДИ, АИ, ДА}.

Здесь “И” обозначает интегратор

$$\dot{z} = bu(t), \tag{3.14}$$

“А” – инерционный объект первого порядка (апериодическое звено)

$$\dot{z} = az(t) + bu(t), \tag{3.15}$$

“ДИ” обозначает двойной интегратор

$$\dot{z}_1 = z_2(t),\ \dot{z}_2 = bu(t), \tag{3.16}$$

“АИ” – апериодическое звено и интегратор (реальный двойной интегратор)

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2(t), \\ \dot{z}_2 &= az_2(t) + bu(t), \end{aligned} \tag{3.17}$$

а “ДА” обозначает двойное апериодическое звено

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2(t), \\ \dot{z}_2 = a_1 z_1(t) + a_2 z_2(t) + bu(t). \end{cases} \tag{3.18}$$

Модели, задаваемые уравнениями (3.14)–(3.18), могут содержать запаздывание по каналу управления, т.е. $\dot{z} = bu(t-\tau)$

Кроме того, задается допустимая погрешность модели (3.3) в форме максимальной абсолютной погрешности, т.е.

$$\nabla t \in [t_0, t_k]; \ \max\{|y(t_i) - z_1(t_i)|, 1 = 0,1,..., k\} \le \Delta Y_{\text{доп}}, \qquad (3.19)$$

где $\Delta Y_{\text{доп}}$ – допустимая абсолютная погрешность. Например, при нагреве $\Delta Y_{\text{доп}}$ берётся $2^0 C$.

Допускается использование различных параметров модели для различных диапазонов (стадий модели) выходной переменной, т.е. использование модели на МСФ вида:

$$\dot{z} = A_j z(t) + B_j u(t), j = 1,..., m, \qquad (3.20)$$

где A_j, B_j – значения параметров модели для $j-$ го диапазона выходной переменной; m – число диапазонов (стадий) на всём интервале изменения y.

Требуется определить число диапазонов m, вид уравнения и значения параметров A_j, B_j для каждого диапазона. Предполагается подход к аппроксимации модели, позволяющий в интерактивном режиме оперативно определять вид модели и оценивать ее параметры.

Приведем расчетные соотношения для оценки параметров различных моделей [109].

Интегратор (см. (3.15)) имеет вид

$$\hat{b}(t_i) = \frac{y(t_{i+1}) - y(t_i)}{u(t_i) \cdot \Delta t}, \qquad (3.21)$$

здесь минимальный временной интервал расчета совпадает с временным шагом дискретизации Δt.

Инерционный объект первого порядка (апериодическое звено) (см. (3.16)) задается следующими условиями:

$$\hat{a}_i = \frac{1}{\Delta t} ln\, c_i, b_i = \frac{d_i \cdot \hat{a}_i}{c_i - 1},$$

$$c_i = \frac{y(t_i)u(t_i) - y(t_{i+1})u(t_{i-1})}{\Delta_i},$$

$$d_i = \frac{y(t_{i+1})y(t_{i-1}) - y^2(t_i)}{\Delta_i}, \tag{3.22}$$

$$\Delta_i = y(t_{i-1})u(t_i) - y(t_i)u(t_{i-1}),$$

здесь минимальный временной интервал расчета равен $2\Delta t$, т.е. $[t_н;\ t_k] = [t_{i-1};\ t_{i+1}]$.

Объект двойного интегрирования (см. (3.17)) определяется как

$$\hat{b}_i = \frac{y(t_{i+1}) - y(t_i) - \hat{z}_2(t_i) \cdot \Delta t}{u(t_i) \cdot \Delta t^2}, \tag{3.23}$$

здесь $\hat{z}_2(t_i)$ – оценка скорости изменения переменной y в момент времени t_i.

Оценка $\hat{b}_i$ и $\hat{z}_2(t_i)$ одновременно производится при решении следующей системы линейных уравнений

$$\left.\begin{aligned} (t_j - t_i)\hat{z}_2(t_i) + \frac{u_{ij}}{2}(t_j - t_i)^2 \cdot \hat{b} = y(t_j) - y(t_i), \\ (t_k - t_i)\hat{z}_2(t_i) + \frac{u_{ik}}{2}(t_k - t_i)^2 \cdot \hat{b} = y(t_k) - y(t_i); \end{aligned}\right\} \tag{3.24}$$
$$i < j < k,$$

здесь через u_{ij}, u_{ik} обозначены усредненные управляющие воздействия на интервалах времени $[t_i, t_j]$, $[t_i, t_k]$, соответственно.

Для объекта реального двойного интегрирования (см. (3.18)) параметры a, b определяются решением следующих простых уравнений

$$\left.\begin{aligned} \hat{z}_2(t_i)c + d(c - \Delta t)u_i = y(t_{i+1}) - y(t_i), \\ \hat{z}_2(t_{i+1})c + d(c - \Delta t)u_{i+1} = y(t_{i+2}) - y(t_{i+1}); \end{aligned}\right\} \tag{3.25}$$

$$\hat{a} = \frac{e^{a\Delta t} - 1}{c},\ \ \hat{b} = d\hat{a}. \tag{3.26}$$

Оценка трех величин $\hat{z}_2(t_i)$, a и b для данной модели может производиться решением трех уравнений

$$\begin{aligned} &\hat{z}_2(t_i)+\hat{a}\cdot\Delta y_1+\hat{b}\cdot\Delta t\cdot u=z_2(t_{i+1}),\\ &\hat{z}_2(t_i)+\hat{a}\cdot\Delta y_2+\hat{b}\cdot 2\Delta t\cdot u=z_2(t_{i+2}),\\ &\hat{z}_2(t_i)+\hat{a}\cdot\Delta y_3+\hat{b}\cdot 3\Delta t\cdot u=z_2(t_{i+3}); \end{aligned} \tag{3.27}$$

здесь $\Delta y_i = y(t_{i+1}) - y(t_i)$ и предполагается, что на интервале времени $[t_i, t_{i+3}]$ управление постоянно.

Для объекта управления, описываемого моделью вида ДА сначала решаются системы уравнений

$$\begin{aligned} &c_1 z_1(t_{i-1})+c_2 z_2(t_{i-1})+c_3 u(t_{i-1})=z_1(t_i),\\ &d_1 z_1(t_{i-1})+d_2 z_2(t_{i-1})+d_3 u(t_{i-1})=z_2(t_i), \quad i=1,2,3. \end{aligned}$$

Далее параметры модели определяются по промежуточным величинам $c_1, c_2, c_3, d_1, d_2, d_3$ по формулам

$$\hat{a}_1=\frac{d_1}{c_2}, \quad \hat{a}_2=\frac{d_2-1}{c_2}, \quad \hat{b}=\frac{d_3}{c_2}, \tag{3.28}$$

Необходимо отметить, что в приведенных формулах оценки параметров (3.21)–(3.27) в качестве Δt могут использоваться временные интервалы кратные Δt, т.е. $2\Delta t$, $3\Delta t$ и т.д.

Наряду с формулами оценки параметров фрейм аппроксимации содержит расчётные соотношения для сглаживания экспериментальных зависимостей. Здесь используется стандартный метод сглаживания четвёртыми разностями и оригинальный метод избирательного сглаживания выделяемых зон [109].

Описание алгоритма идентификации модели динамики

Алгоритм идентификации модели динамики состоит в выполнении следующих этапов. Экспериментальным или аналитическим путём, используя математическую модель, получают последовательности значений выходной

переменной y, управления u и формируют файл входных данных, содержащий информацию о времени; его отображают графически в виде точек $y(t_i)\ i = 0, 1, 2, \ldots$ и планируются работы по сглаживанию последовательности (3.1), чтобы устранить ошибки вызываемые округлением при отсчетах и т.п. Обычно производится однократное сглаживание массива точек $\{y(t_i)\}$.

Далее, исходя из физико-химических основ управляемого процесса, с учетом множества состояний функционирования, исследуются гипотезы о структуре модели, в частности числе зон в рассматриваемом интервале изменения выходной переменной y, о точках стыковки по фазовым координатам различных зон, с учетом нелинейности процесса, и о виде модели для каждой зоны.

Затем определяется модель зоны. На данном этапе выполняются следующие расчёты:

а) для выбранной модели производится текущая оценка ее параметров по формулам (3.14)–(3.28) с минимальным шагом временной дискретизации, при этом верхняя граница каждой зоны берётся заведомо завышенной (внутри последующей);

б) при получении оценок параметров модели требуется определить:

– соответствуют ли их значения физико-химической основе изучаемого процесса (иначе, подбирается другой вид модели);

– можно ли использовать описание процесса с постоянными параметрами в пределах выбранных границ зоны;

в) усредняются значения параметров для каждой зоны;

г) производится проверка адекватности модели зоны. Если модель зоны не удовлетворяет требованиям адекватности, то изменяется либо её вид, либо границы зоны.

Заметим, что увеличение числа зон приводит к увеличению точности модели, но, в то же время, дает рост объёма вычислений при синтезе управляющих воздействий. Обычно число зон выбирают равных трем, что

позволяет адекватно описывать исследуемые процессы и оперативно синтезировать управляющие воздействия [109].

3.2 Идентификация модели процесса нагрева многокамерного объекта управления

Особенностями идентификации моделей многокамерных объектов является учет влияния камер друг на друга. Рассмотрим идентификацию структуры модели на примере СВЛ [84]. Упрощенная схема многокамерной СВЛ представлена на рис.(3.2).

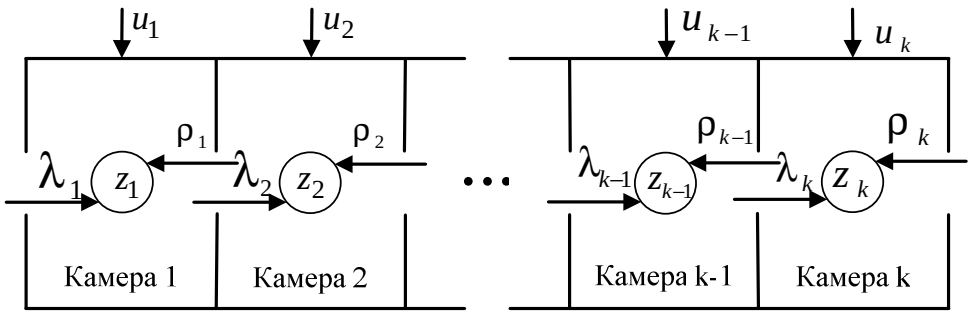


Рисунок 3.2 – Схема многокамерной СВЛ

На схеме обозначено: $z_i, i=\overline{1,k}$ – температура в i-ой камере ($^\circ C$); u_i – управляющее воздействие (процент открытия вентиля подачи пара, %); λ_i, ρ_i – действующие дестабилизирующие факторы со стороны соседних камер СВЛ.

В ИИУС ТТА предлагается модель динамики многокамерного объекта идентифицировать множеством моделей, описывающих динамические режимы отдельных камер. Основываясь на конструктивных и технологических соображениях, будем рассматривать каждую камеру как отдельный объект с сосредоточенными параметрами, для описания которого пригодна модель в виде

системы дифференциальных уравнений с разрывной правой частью [12]. Динамика процесса нагрева СВЛ описывается множеством моделей для отдельных камер:

$$\mathcal{M}_{\text{нр}} = \{\mu_1, \mu_2, ..., \mu_k\} \qquad (3.29)$$

где $\mu_i, i = \overline{1,k}$ – модель *i*-ой камеры, имеющая следующий вид

$$\mu_i: \ \dot{z}_i = \begin{cases} A_i^1 z_i^1(t) + B_i^1 u_i^1(t) + C_i^1 \lambda_i^1(t) + D_i^1 \rho_i^1(t), & z_i^1 \in [z_0^1, z_к^1); \\ A_i^2 z_i^2(t) + B_i^2 u_i^2(t) + C_i^2 \lambda_i^2(t) + D_i^2 \rho_i^2(t), & z_i^2 \in [z_0^2, z_к^2); \\ \ldots & \ldots \\ A_i^j z_i^j(t) + B_i^j u_i^j(t) + C_i^j \lambda_i^j(t) + D_i^j \rho_i^j(t), & z_i^j \in [z_0{}^j, z_к^j], \end{cases} \qquad (3.30)$$

здесь *j* соответствует номеру зоны модели, *i* обозначает номер камеры ($j = \overline{1,\pi}$, $i = \overline{1,n}$), $A_i^j, B_i^j, C_i^j, D_i^j$ – параметры модели в матричном виде; z_i^j – фазовые координаты; z_{i0}^j, z_{ik}^j – границы зоны.

Дестабилизирующие факторы, действующие со стороны соседних камер, вычисляются по формулам:

$$\lambda_i^j(t) = z_i^j(t) - z_{i-1}^j(t), \ \rho_i^j(t) = z_i^j(t) - z_{i+1}^j(t).$$

Каждая зона системы (3.30) представима одной из базовых динамических моделей (3.14)–(3.18) [109].

С целью определения вида модели каждой камеры, числа зон и оценки параметров моделей снимались термограммы разогрева различных камер исследуемых СВЛ.

В результате идентификации модели нагрева многокамерных объектов управления были получены модели, соответствующие различным камерам ТТА. В качестве основного критерия адекватности использовался выбор модели с минимальным значением абсолютной погрешности Δz [221]. Полученные модели приведены в главе 7.

3.3 Используемые модели динамики разгона электродвигателей

Для решения задач оптимального энергосберегающего управления оборудованием движения рабочих органов ТТА в базе знаний ИИУС используются математические модели динамики электродвигателей различных типов. Традиционно режимы работы двигателей постоянного тока описываются с помощью систем функциональных или дифференциальных уравнений [262, 263].

Известно, что на практике при построении моделей работы таких двигателей используются следующие допущения: нулевые начальные условия; сам двигатель представляется объектом, со сосредоточенными параметрами; коэффициенты, входящие в основное уравнение постоянны; динамика нагрузки описывается кусочно-постоянными функциями. Тогда его динамическую модель можно представить в виде дифференциального уравнения третьего порядка

$$\dot{z}_1 = z_2(t), \quad \dot{z}_2 = z_3(t), \quad \dot{z}_3 = a_1 z_2(t) + a_2 z_3(t) + bu, \tag{3.31}$$

здесь угловые: расстояние – z_1 (рад); скорость – z_2 (рад/с); ускорение – z_3 (рад/с^2). Параметры модели a_1, a_2, b имеют физический смысл и зависят от ряда величин: сопротивления якорной цепи, индуктивности якорной цепи, приведенного коэффициента нагрузки, приведенного момента инерции вращающихся частей, конструктивных параметров электромагнитного момента и т.д. [263, 262].

С тем, чтобы понизить порядок системы (3.31), за фазовые координаты принимают угловую скорость на валу и ускорение, при этом модель описывается двойным апериодическим звеном (ДА). Принимая во внимание, что у промышленных двигателей индуктивность якорной цепи меньше единицы и коэффициент пропорциональности намного меньше единицы, а приведенный момент инерции вращающихся частей намного больше единицы, модель (3.31) упрощается и принимает вид апериодического звена (А) [237, 238, 250]. Модель ДА используется при анализе управляющего воздействия, так как она более точна, чем модель А, которая проще и удобнее для синтеза управляющего воздействия в реальном масштабе времени [237, 238, 250].

Благодаря конструктивной простоте, асинхронный двигатель широко применяется в электроприводах рабочих органов ТТА. Пренебрегая электромагнитным переходным процессом в стали статора и ротора, при управлением напряжением статора или при управления током ротора в качестве модели также можно использовать дифференциальные уравнения, соответствующие объекту первого порядка [237, 238, 250].

Проанализировав ряд источников [237, 238, 250], видно, что в большинстве случаев динамику двигателей различных типов принято описывать инерционным объектом первого порядка (апериодическим звеном).

3.4 Задачи управления режимом «Процесс» на примере вальцеленточных сушильных установок

Задача управления процессом сушки ставится как задача управления объектом – с распределенными параметрами. Рассмотрим ее, применительно к СВЛ.

СВЛ представляют собой коридор, разделенный на камеры (рис. 3.3). В нем размещены пластинчатый и скребковый транспортеры для перемещения пастообразного материала в камерах. Противоточно движению материала в камерах циркулирует нагретый воздух, подогрев которого происходит в паровых калориферах. Измельчение и укладка материала на продуктовый транспортер производится с помощью формовочных вальцов. В некоторых модификациях сушилок вальцы отвечают и за первоначальный подогрев материала. Для увеличения эффекта усадки высушиваемого материала и поверхности контакта фаз (твердой – пигмент, газообразной – сушильный агент) в процессе сушки в первой секции может быть установлено перемешивающее устройство (ворошитель). Приток сушильного агента в камерах СВЛ производится через воздухозаборные окна, а отвод отработанного сушильного агента происходит через сбросные шиберы с помощью вытяжного вентилятора [224]. Исследуемые

сушилки могут иметь различное количество камер от четырех до восьми, но они спроектированы и настроены так, чтобы характерные участки кинетической кривой процесса соответствовали отдельным камерам. Обычно у каждой камеры имеются свои конструктивные отличия, и в камерах можно задавать свой гидродинамический и температурный режим [155].

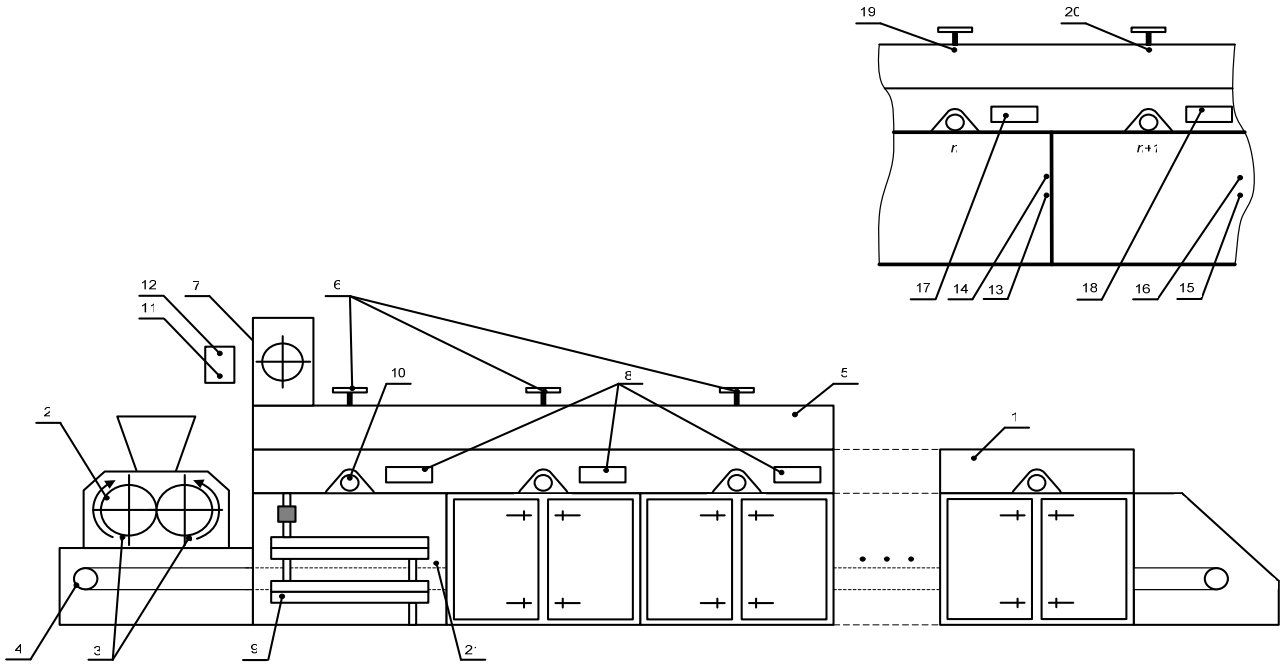


Рисунок 3.3. Вальцеленточная сушильная установка (СВЛ)
1 – корпус, 2 – вальцы, 3 – ножи, 4 – лента пластинчатого конвеера, 5 – система отвода нагретого воздуха, 6 – шиберы, 7 – вытяжной вентилятор, 8 – воздухозаборные окна, 9 – калориферы, 10 – рециркуляционные вентиляторы, 11 – датчик входной температуры воздуха, 12 – датчик входной влажности воздуха, 13 и 14 – датчики температуры и влажности воздуха в n-й камере, 15 и 16 – датчики температуры и влажности воздуха в (n+1)-й камере, 17 и 18 – датчики открытия воздухозаборных окон в n-й и (n+1)-й камерах, 19 и 20 – датчики открытия шиберов в n-й и (n+1)-й камерах, 21 – датчик наличия/отсутствия ворошителя.

Как объекты управления, сушильные установки вальцеленточного типа представляют собой многомерные системы с распределенными параметрами [68, 73], обладающие рядом особенностей: наличием многих управляющих и возмущающих воздействий; необходимостью обеспечения требуемой влажности материала, исходя из косвенных оценок; комбинированным критерием

оптимальности, включающим оценку качества и производительности процесса сушки.

Сушка – это тепло-технологический процесс, определяющий качество конечного продукта, состоящий из трех основных этапов [155]: 1) разогрев материала, 2) постоянная скорость процесса, 3) падающая скорость процесса.

На первом этапе температура материала повышается, но влажность его снижается незначительно (см. рис. 3.4).

На втором этапе происходит поверхностное испарение влаги, при этом скорость сушки почти неизменна, она соответствует скорости диффузии паров влаги с поверхности сохнущего пастообразного материала [155].

На третьем этапе процесса сушки скорость определяется перемещением влаги из толщины материала на его поверхность (так называемой внутренней диффузией). С началом третьего этапа поверхность сохнущего материала покрывается корочкой, вследствие чего поверхность испарения уменьшается. Это ведет к увеличению сопротивления процессу внутренней диффузии, и соответственно – к уменьшению скорости сушки. Толщина и структура материала влияют на процесс испарения влаги с его поверхности [155].

Показателем качества материала на выходе СВЛ является его абсолютная конечная влажность $\varphi_k^к$. В соответствии с технологическими требованиями, конечная влажность широко используемого в печатном деле пигмента рубинового ВКС не может превышать 1-го процента, т.е. $\varphi_k^к < 1\%$ [224]. На влажность конечного продукта $\varphi_k^к$ влияют различные факторы, распределенные по всей длине СВЛ: начальная влажность материала, температура и влажность воздуха в камерах, положения воздухозаборных окон, шиберов, наличие или отсутствие ворошителя, время работы вытяжного вентилятора и др. [209].

На этапе с постоянной скоростью процесса сушки из материала удаляется максимальное количество влаги (основной или поверхностной). Камеры, обеспечивающие постоянную скорость процесса, определяет качество конечного продукта. Именно эти камеры и должны быть *контролируемыми*. В этих камерах

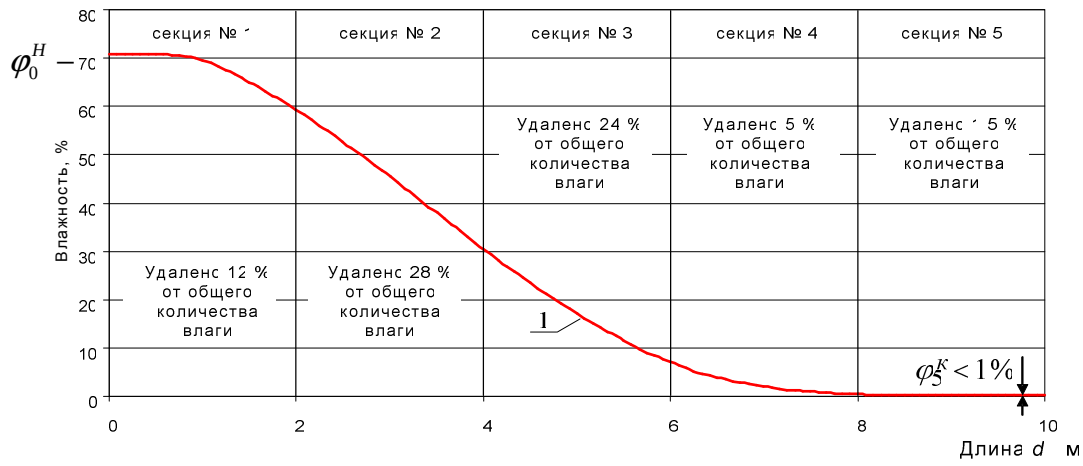
имеется воздухозаборное окно, паровой калорифер, сбросной шибер, вытяжной вентилятор, ворошитель.

С тем, чтобы установить датчики 12–20 (см. рис. 3.3) необходимо определить номера контролируемых камер, в виду того, что в различных сушильных установках вальце ленточного типа (СВЛ) самыми напряженными по влагосъему являются камеры разных порядковых номеров [209]. Определяемые номера контролируемых камер могут зависеть от общего количества k камер в СВЛ, конструктивных особенностей самих камер, их настроек, наличия или отсутствия обогрева на вальцах и др.

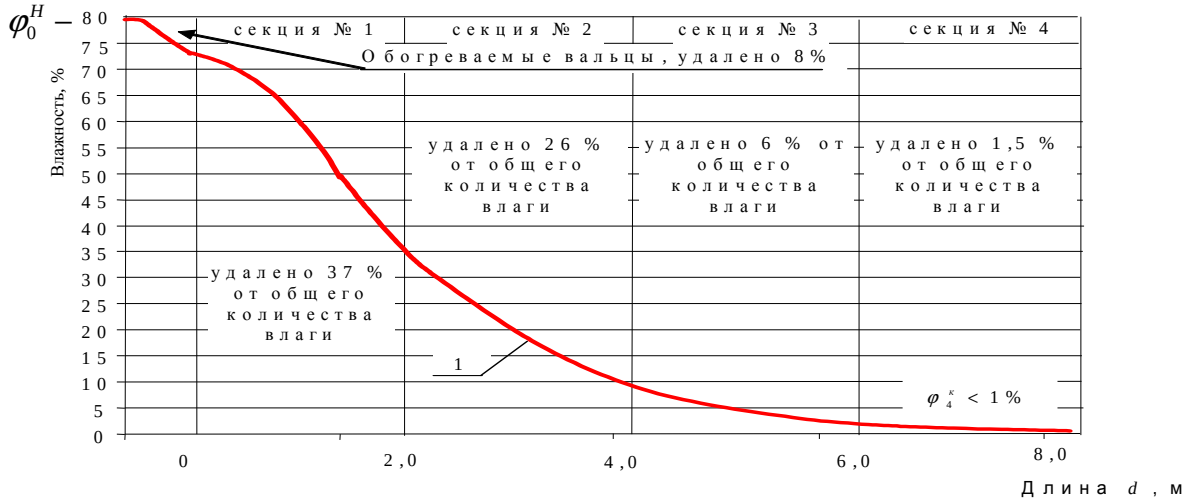
Выявить камеры, в которых удаляется максимальное количество влаги, дают возможность заданные кинетические кривые. Например, для пяти камерных СВЛ с не обогреваемыми вальцами (рис. 3.4 а) в качестве первой контролируемой камеры выбирается вторая камера ($n=2$), а в качестве второй контролируемой камеры – третья ($n+1=3$). Для четырех камерных СВЛ с обогреваемыми вальцами (рис. 3.4 б) номера контролируемых камер 1 и 2. Из приведенных кинетических кривых на рис. 3.4 а, б, видно, что в контролируемых камерах удаляется порядка 60–80% от начального количества влаги [209].

Требуемое качество продукции достигается в основном за счет управления режимами работы сушильной установки. С этой целью следует учитывать различные особенности СВЛ, при этом можно сформулировать ряд задач синтеза управляющих воздействий на процесс сушки [15].

а) пяти камерная СВЛ, $k=5$



б) четырех камерная СВЛ, $k = 4$



в) – шести камерная СВЛ, $k = 6$

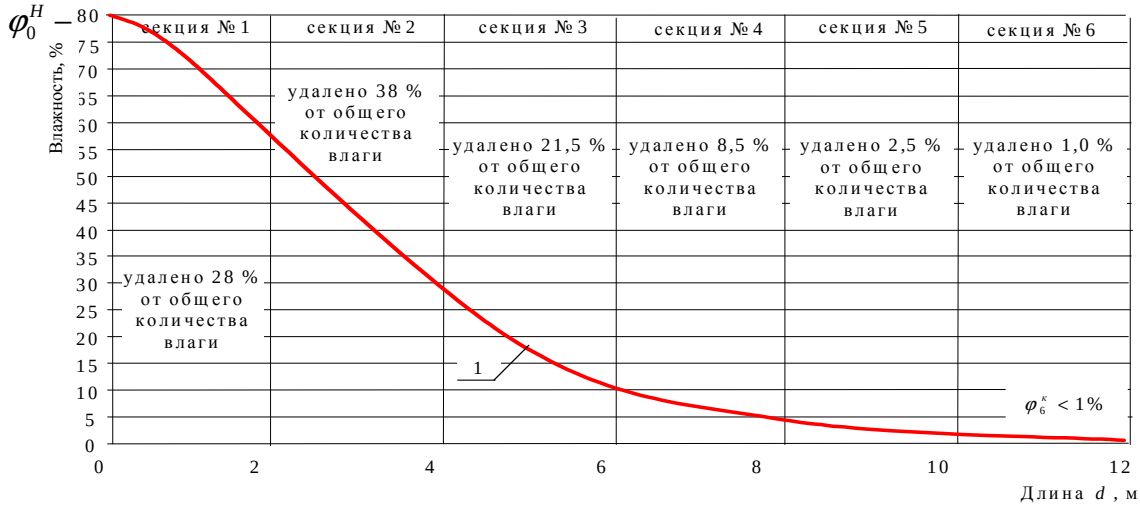


Рисунок 3.4. Кинетические кривые сушки в СВЛ, φ_0^H – начальная влажность материала; d – длина СВЛ, м.

Требуемое качество продукции достигается в основном за счет управления режимами работы сушильной установки. С этой целью следует учитывать различные особенности СВЛ, при этом можно сформулировать ряд задач синтеза управляющих воздействий на процесс сушки [15].

Задачу управления процессом сушки можно сформулировать в общем виде (2.1)–(2.4).

Вектор выхода y в задаче (2.1)–(2.4) задается такими компонентами, как влажность материала на выходах n-ой и $(n+1)$-ой контролируемых камер, а также на выходе всей сушильной установки – $\varphi_k^к$. На рис. 3.5 приведена

структура пятисекционной СВЛ как объекта управления. Векторы управляющих и возмущающих воздействий записываются в виде:

$$u = (u_o^{\text{сл}}, u_n^{\text{взо}}, u_n^{\text{сш}}, u_{n+1}^{\text{взо}}, u_{n+1}^{\text{сш}}, u_o^{\text{вв}}); \tag{3.32}$$

$$x = (\varphi_н, \varphi_n^{\text{к}}, x_n^{\text{тса}}, x_n^{\text{вса}}, x_n^{\text{вор}}, x_{n+1}^{\text{тса}}, x_{n+1}^{\text{вса}}, x_o^{\text{тов}}, x_o^{\text{вов}}), \tag{3.33}$$

где $u_n^{\text{взо}}, u_n^{\text{сш}}, u_{n+1}^{\text{взо}}, u_{n+1}^{\text{сш}}$ – управление воздухозаборными окнами и сбросными шиберами соответственно n-ой и $(n+1)$-ой контролируемых камер; $u_o^{\text{вв}}$ – управление (включение – выключение) вытяжным вентилятора; $u_o^{\text{сл}}$ – управление движением пластинчатого конвейера; $x_n^{\text{тса}}$, $x_n^{\text{вса}}$ – температура и влажность воздуха в n-ой контролируемой камере; $x_n^{\text{вор}}$ – наличие или отсутствие ворошителя на входе n-ой контролируемой камеры; $x_{n+1}^{\text{тса}}$, $x_{n+1}^{\text{вса}}$ – температура и влажность сушильного агента в и $(n+1)$-ой контролируемой камере; $x_o^{\text{тов}}$, $x_o^{\text{вов}}$ – температура и влажность воздуха в цехе [15].

Примем, скорость движения продуктового пластинчатого конвейера в качестве основной компоненты вектора управляющих воздействий u. При необходимости, в качестве дополнительных компонент вектора управляющих воздействий могут выступать степени открытия воздухозаборных окон и сбросных шиберов контролируемых камер СВЛ.

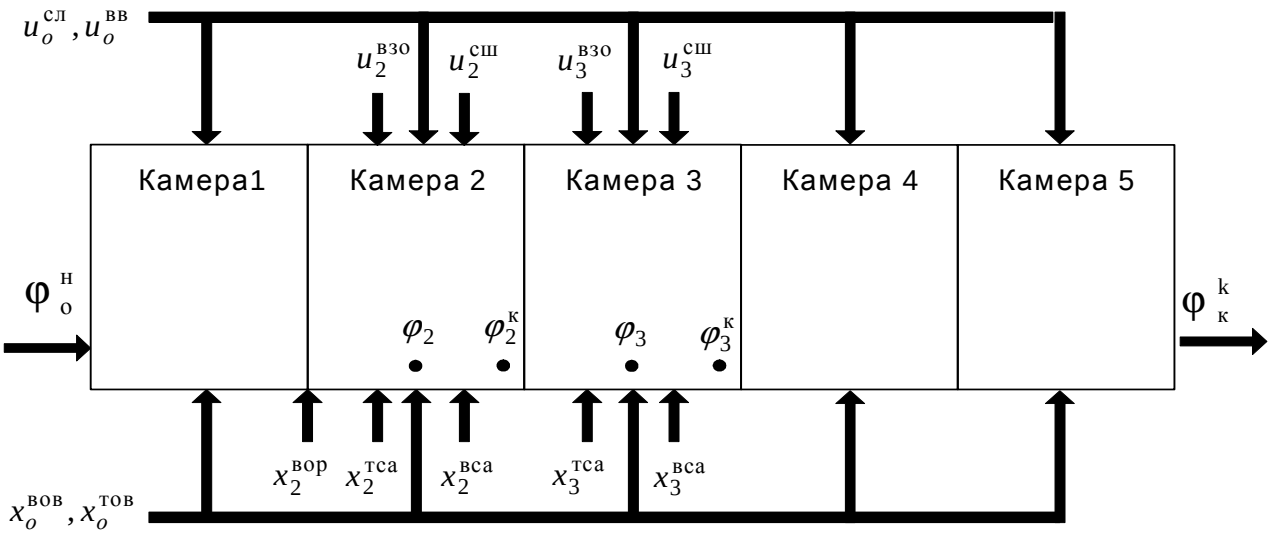


Рисунок 3.5. Схема управляющих и возмущающих воздействий пяти камерной СВЛ

На основании анализа экспериментальных данных, делаем вывод, что потери производительности ΔПр зависят от управления u линейно, а также, что зависимость потерь качества ΔК от управления u близка к параболической. Таким образом, комплексный критерий Q минимизации потерь качества и производительности представляется в виде:

$$Q = c_1(b_0 + b_1 u^2) + c_2(a_0 + a_1 u) \to \min_u. \qquad (3.34)$$

где c_1, c_2 – весовые коэффициенты, отражающие степени значимости соответственно качества и производительности в решаемой задаче; b_0, b_1 – параметры параболической (второго порядка) функции, a_0, a_1 – параметры линейной функции [15].

Множество состояний функционирования $\mathcal{H}$ включает в себя возможные траектории $h(\cdot)$ изменения влажности по длине СВЛ: $h(\cdot) = (\varphi_n, \varphi_{n+1}, \varphi_k^{\text{к}})$.

Будем различать задачи синтеза управляющих воздействий на процесс сушки применительно к любой одной (из двух) или сразу к двум контролируемым камерам; соответственно, управление происходит партией материала в один или два момента времени, соответствующих его нахождению в контролируемых камерах. Задача синтеза управляющих воздействий решается на основе информации о влажности материала, получаемой в центре контролируемой камеры (соответственно, контролируемых камер), а также измеренных текущих значениях процесса сушки [15].

Математически задача для m-ой партии материала и контроля влажности в одной из камер может быть представлена в следующем виде. Должны быть заданы:

– модель оценки влажности материала в n-ой (аналогично, $(n+1)$-ой) контролируемой камере сушильной установки

$$\varphi_n(t_n^m) = f(u_n, x_n, A_n), \qquad (3.35)$$

где t_n^m – момент времени определения влажности m-ой партии материала в n-ой камере; A_n – массив параметров модели для определения влажности материала в

центре n-ой контролируемой камеры; векторы управляющих u_n и возмущающих x_n воздействий содержат следующие компоненты:

$$u_n = (u_o^{\text{сл}}, u_n^{\text{взо}}, u_n^{\text{сш}}, u_o^{\text{вв}}); \tag{3.36}$$

$$x_n = (\varphi_{\text{н}}, x_n^{\text{тса}}, x_n^{\text{вса}}, x_n^{\text{вор}}, x_o^{\text{тов}}, x_o^{\text{вов}}), \tag{3.37}$$

– условия, которым должны удовлетворять управляющие воздействия u_n и выходная переменная φ_n:

$$u_n \in U_n^{\text{доп}}; \tag{3.38}$$

$$\varphi_n \in Y_n^{\text{доп}}, \tag{3.39}$$

здесь $U_n^{\text{доп}}$ – область изменения значений управляющих воздействий в n-ой контролируемой камере; $Y_n^{\text{доп}}$ – область допустимых значений влажности в n-ой контролируемой камере сушильной установки;

– минимизируемый функционал

$$Q_n = c_1 \Delta\text{К}(u_n) + c_2 \Delta\text{Пр}(u_n) \to \min_{u_n}. \tag{3.40}$$

В случае, если при прохождении m-ой партии материала в n-ой контролируемой камере влажность материала, оцененная по модели (3.35), не удовлетворяет условию (3.39), то необходимо синтезировать соответствующее управляющее воздействие

$$u_n^* = \arg\min_{u_n} Q_m(\Delta\text{К}, \Delta\text{Пр}, c_1, c_2, u_n), \tag{3.41}$$

с целью корректировки показаний. При этом следует также контролировать выполнение условия (3.38) и достижение минимума функционалом (3.40) [15].

Для алгоритмизации синтеза управляющих воздействий следует также задать массив начальных данных

$$R = (A_n, x_n(t_n^m), u_n(t_n^m), U_n^{\text{доп}}, Y_n^{\text{доп}}, c_1, c_2). \tag{3.42}$$

В случае контролирования влажности материала в двух камерах математическая формулировка задачи следующая. Задаются:

– модель определения влажности материала в n-ой и $(n+1)$-ой контролируемых камерах СВЛ

$$f_m(A_n, A_{n+1}, \varphi_n(t_n^m), \varphi_{n+1}(t_{n+1}^m), \varphi_k^{\text{к}}(t_{\text{к}}^m), u_n, u_{n+1}, x_n, x_{n+1}) = 0, \qquad (3.43)$$

где t_n^m, как и ранее, обозначает момент определения влажности m-ой партии материала в n-ой камере, t_{n+1}^m – момент определения влажности материала в $(n+1)$-ой контролируемой камере, $t_{\text{к}}^m$ – момент определения влажности в конечной камере; A_{n+1} – массив параметров модели для расчета влажности в $(n+1)$-ой контролируемой камере;

$$u_{n+1} = (u_o^{\text{сл}}, u_{n+1}^{\text{взо}}, u_{n+1}^{\text{сш}}, u_o^{\text{вв}}); \qquad (3.44)$$

$$x_{n+1} = (\varphi_n, x_{n+1}^{\text{тса}}, x_{n+1}^{\text{вса}}, x_o^{\text{тов}}, x_o^{\text{вов}}), \qquad (2.34)$$

представляют собой вектор управляющих u_{n+1} и вектор возмущающих x_{n+1} воздействий;

– условия, которым должны удовлетворять управляющие воздействия u_n, u_{n+1} и значения влажности материала φ_n, φ_{n+1}, $\varphi_k^{\text{к}}$:

$$u_n \in U_n^{\text{доп}},\ u_{n+1} \in U_{n+1}^{\text{доп}}; \qquad (3.46)$$

$$\varphi_n \in Y_n^{\text{доп}},\ \varphi_{n+1} \in Y_{n+1}^{\text{доп}},\ \varphi_k^{\text{к}} \in Y_{\text{к}}^{\text{доп}}, \qquad (3.47)$$

здесь $U_{n+1}^{\text{доп}}$ – область изменения значений управляющих воздействий в $(n+1)$-ой контролируемой камере; $Y_{n+1}^{\text{доп}}$, $Y_k^{\text{доп}}$ – области допустимых значений влажности в $(n+1)$-ой контролируемой камере и конечная влажность материала;

– минимизируемый функционал

$$Q_m(\Delta\text{К}, \Delta\text{Пр}, u_{n+1}) \to \min_{u_{n+1}}; \qquad (3.48)$$

– множество состояний функционирования СВЛ

$$\mathcal{H} = \{h_l(\cdot),\ l = \overline{l, L}\}. \qquad (3.49)$$

При прохождении материала в n-й и $(n+1)$-ой контролируемых камерах, в них оценивается его влажность, кроме этого по продукционной модели (3.56)

прогнозируется мера доверия к выходной влажности материала из сушильной установки; затем проверяется выполнение условий (3.47), в случае необходимости синтезируется корректирующее управляющее воздействие:

$$u_{n+1}^{*} = \arg\min_{u_{n+1}} Q_m(\Delta К, \Delta Пр, u_{n+1}); \quad (3.50)$$

одновременно следует контролировать выполнение условия (3.46), и достижение минимального значения функционалом (3.48) [15].

Кроме этого, для алгоритмизации синтеза управляющих воздействий необходимо задать массив исходных данных

$$R = (A_n, A_{n+1}, x_n(t_m), u_n(t_m), x_{n+1}(t_m), u_{n+1}(t_m), U_n^{доп}, U_{n+1}^{доп}, Y_n^{доп}, Y_{n+1}^{доп}, Y_к^{доп}, \mathcal{H}). \quad (3.51)$$

Для решения сформулированных задач управления режимами сушки требуется оценивать влажность материала внутри n-ой и $(n+1)$-ой камер и на выходе последней k-ой камеры СВЛ [15].

3.5 Идентификация модели оценки влажности пастообразного материала в процессе его сушки в вальцеленточной сушильной установке

При оптимальном управлении процессом с целью минимизации потерь качества продукта и производительности в СВЛ, необходимо производить оценку влажности материала в процессе его сушки в зависимости от значений управляющих и возмущающих воздействий. Исходя из особенностей процессов в СВЛ, организация оценки влажности пастообразного материала в камерах сушильной установки в реальном времени точными измерительными устройствами представляется весьма затруднительной [210]. Как было описано выше (см. раздел 3.4), в целях производства качественной продукции в СВЛ необходимо введение ограничений на изменение влажности материала в контролируемых камерах, а также ограничение на конечную влажность материала, вытекающие из требований соответствующего технологического

регламента. Подобные условия существенно усложняют задачу идентификации моделей, применимых для алгоритмизации синтеза управляющих воздействий процесса сушки. Пути выхода из этой ситуации предлагается искать в использовании технологий искусственного интеллекта, в том числе с применением нейронных сетей [142].

Под искусственной нейронной сетью понимают набор конечного числа слоев, состоящих из однотипных элементов, называемых, применительно к этой теории, нейронами. Между слоями существуют различные типы связей. Число нейронов в слоях может быть различным. Оно выбирается с учетом условий и требуемого качества решения задачи. На число слоев имеется ограничение по времени решения задачи. Известно, что нейронные сети являются удобными средствами аппроксимации. Созданная из простых элементов нейронная сеть может решать достаточно сложные задачи [142].

Создание одной нейронной сети для оценки влажности пастообразного материала в камерах СВЛ происходит по следующему алгоритму.

I. Накопление статистических данных массивов u, x, y, удовлетворяющих условиям:

– репрезентативности (собранные данные должны правильно представлять влияние всех факторов на влажность пастообразного материала в камере);

– непротиворечивости;

– достаточности объема выборки.

(Статистическая выборка для расчета влажности материала в камерах конкретной СВЛ, установленной в ОАО «Пигмент» (г. Тамбов), приведена в Приложении В).

II. Разделение собранных статистических данных на обучающую и тестовую выборки. Выделение обучающей и тестовой части выборки достаточно произвольно.

III. Нормировка собранных данных – приводятся их к виду, пригодному для подачи на входы нейронной сети. Нормировка производится с целью избавления от размерностей собранных статистических данных и приведение данных к

единому диапазону с тем, чтобы полученные на разных входах данные оказывали равнозначное влияние на выход нейронной сети [269].

IV. Выбор типа нейронной сети и ее топологии.

На выбор типа нейронной сети оказывает влияние постановка решаемой задачи и имеющийся набор статистических данных. Выбор топологии нейронной сети сводится к определению числа слоев и количества нейронов в каждом из них, а также наличия/отсутствия как обводных соединений, так и сигмовидных активационных функций нейронов.

V. Обучение нейронной сети.

Нейронную сеть можно обучать с “учителем” или без него. Обучение без “учителя” обеспечивается при формировании понятий в самой обучаемой системе. Обучение с “учителем” предполагает наличие внешнего воздействия (внешней меры) для корректировки выходных данных.

В нашем случае при построении нейронной сети присутствует экспертная оценка в виде измеренных значений влажности материала, которая содержится в статистике предварительных наблюдений. Построенная нейронная сеть в некотором порядке перебирает элементы обучающей выборки. Порядок перебора может быть разным. При обучении с учителем, сеть перебирает элементы выборки по нескольку раз.

(В качестве нейронной сети оценки влажности материала в СВЛ нами был выбран многослойный персептрон, обученный по алгоритму обратного распространения ошибки).

VI. Оценка обученной сети.

Результаты обучения нейронной сети необходимы для проверки ее адекватности. Для этого в произвольном порядке на входы обученной нейронной сети подаются данные из тестовой выборки, и рассчитываются погрешности оценок влажности пастообразного материала в камерах СВЛ. Если выполняется требование точности оценки, то полученная нейронная сеть является адекватной.

По данному алгоритму были построены модели для оценки влажности пастообразного материала внутри контролируемых камер СВЛ. Определение

влажности материала $\varphi_i^{к}$ на выходе i-ой камеры с использованием аналитической модели, производится следующим образом [210].

Измерения проводят группами датчиков – общими и датчиками, установленными в i-ой камере. Сигналы, поступающие с датчиков, после нормировки, подают на входы заранее обученной нейронной сети, с выхода которой в реальном времени получают оценку текущей влажности материала в i камере [210].

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 камере, предназначены для определения: влажности и температуры сушильного агента, степени открытия воздухозаборного окна и шибера. На основании информации полученной от датчиков и известного значения начальной влажности материала рассчитываются значения входов нейронной сети [210].

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 – процента времени работы вытяжного вентилятора, x_7, x_8 – средневзвешенных температуры и влажности сушильного агента в i-ой камере; x_9, x_{10} – процента открытия воздухозаборного окна и сбросного шибера. Обучение нейронной сети организуют по образцовым мерам технологических параметров в адаптивном диапазоне i-ой камеры с фиксированной точностью. Нормализация данных производится по следующей формуле

$$x_q^{н} = x_q \cdot K_{амп}^{н} + K_{оф}^{н}, \quad q = \overline{1,\Theta}, \tag{3.52}$$

где q – порядковый номер входа сети; $x_q^{н}, x_q$ – нормированное и ненормированное значения q-го входа сети; $K_{амп}^{н}$, $K_{оф}^{н}$ – амплитудный и

офсетный нормирующие коэффициенты; Θ – количество входов сети, используемой для расчета влажности $\varphi_i^{\text{к}}$ в i-ой камере [210].

Аналитическая модель многослойного персептрона для оценки влажности материала в i-ой камере, обученная по выше приведенному алгоритму, представлена в виде:

$$\overline{\varphi_i} = \left[1+\exp\left(-\beta_{\text{вых}}^{(i)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_i} w_j^{(i\ \text{вых})} \cdot \left(1+\exp\left(-\beta_j^{(i)} \cdot \left[w_{1,j}^{(i)} \cdot \overline{x_1} + w_{2,j}^{(i)} \cdot \overline{x_2} + w_{3,j}^{(i)} \cdot \overline{x_3} + w_{4,j}^{(i)} \cdot \overline{x_4} + \right.\right.\right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left.\left.\left. + w_{5,j}^{(i)} \cdot \overline{x_5} + w_{6,j}^{(i)} \cdot \overline{x_6} + w_{7,j}^{(i)} \cdot \overline{x_7} + w_{8,j}^{(i)} \cdot \overline{x_8} + w_{9,j}^{(i)} \cdot \overline{x_9} + w_{10,j}^{(i)} \cdot \overline{x_{10}}\right] - \theta_j^{(i)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{вых}}^{(i)}\right)\right]^{-1}, \quad (3.53)$$

где для сигмоидальных активационных функций нейронов обозначены через $\beta_j^{(n)}$, $\beta_j^{(n+1)}$ – углы наклона для скрытого слоя, а $\beta_{\text{вых}}^{(n)}$, $\beta_{\text{вых}}^{(n+1)}$ – для выходного слоя нейронной сети, $\theta_j^{(n)}$, $\theta_j^{(n+1)}$ – сдвиги для скрытого слоя и $\theta_{\text{вых}}^{(n)}$, $\theta_{\text{вых}}^{(n+1)}$ – для выходного слоя сети; $w_{i,j}^{(n)}$, $w_{i,j}^{(n+1)}$ и $w_j^{(n\ \text{вых})}$, $w_j^{(n+1\ \text{вых})}$ – весовые коэффициенты связей для скрытого и выходного слоя сети, N_i – число нейронов в скрытом слое сети при расчете влажности материала в i-ой камере сушильной установки; нормированные значения данных влажности материала $\overline{\varphi_i}$, начальной влажности материала $\overline{x_1}$, температуры и влажности окружающей среды $\overline{x_2}$, $\overline{x_3}$; скорости движения пластинчатого конвейера $\overline{x_4}$, наличия или отсутствия ворошителя $\overline{x_5}$, процента времени работы вытяжного вентилятора $\overline{x_6}$, температуры и влажности сушильного агента $\overline{x_7}$, $\overline{x_8}$, процента открытия воздухозаборного окна и сбросного шибера $\overline{x_9}$, $\overline{x_{10}}$ [34].

Для получения данных о влажности материала φ_i в реальных единицах измерения выходной сигнал сети денормализют по формуле:

$$\varphi_i = \frac{\overline{\varphi_i} - K_{\text{оф}}^{\text{дн}}}{K_{\text{амп}}^{\text{дн}}}, \quad (3.54)$$

где $K^{дн}_{амп}, K^{дн}_{оф}$ – амплитудный и офсетный коэффициенты денормализации [34].

Полученная аналитическая зависимость (3.53) позволяет оценивать влажность материала в i камере сушильной установки в реальном времени в процессе его сушки. Аналогично строятся модели и для других камер.

С целью проверки адекватности полученных нейронных сетей была произведена оценка погрешностей расчета по моделям, и были построены графики зависимостей влажности пастообразного материала в пяти камерной СВЛ, рассчитанной для двух лимитирующих камер (второй и третьей $n=2$ и $n+1=3$) по моделям $\varphi^{к}_{n}$ и $\varphi^{к}_{n+1}$ от определенной экспериментально $\varphi^{к,э}_{n}$ и $\varphi^{к,э}_{n+1}$ (см. корреляционные диаграммы на рис. 3.6 и 3.7). Из них видно, что нейронные сети дают достаточно точную оценку реальной влажности исследуемого пастообразного материала [210].

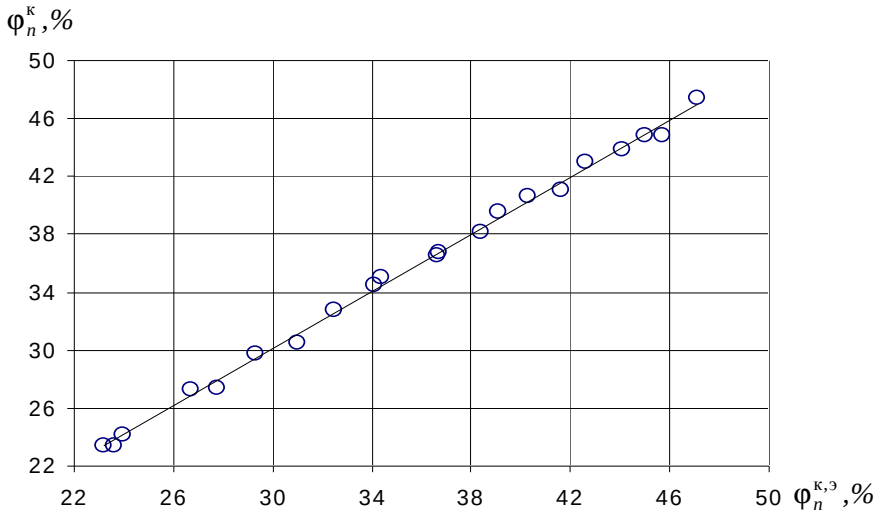


Рисунок 3.6. Корреляционная диаграмма влажности материала
во второй камере пятисекционной сушильной установки

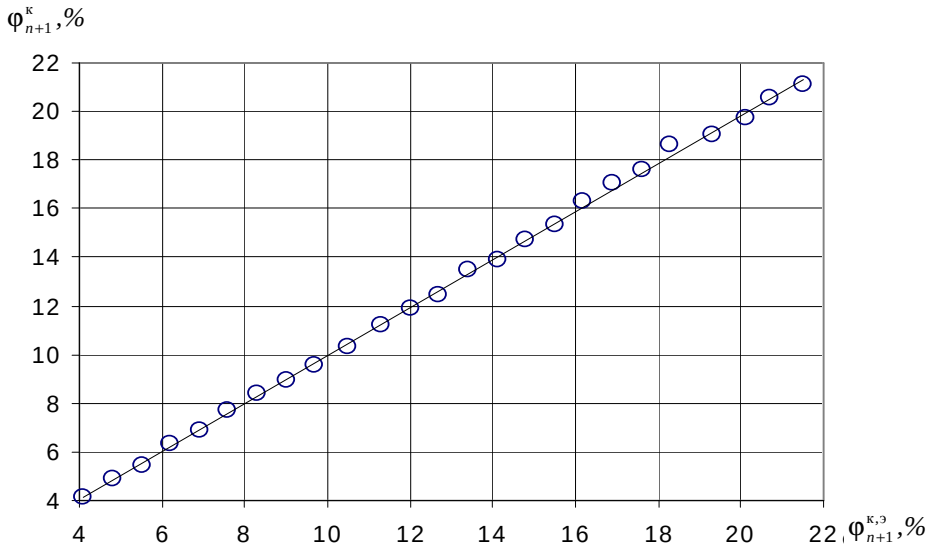


Рисунок 3.7. Корреляционная диаграмма влажности материала
в третьей камере пяти камерной СВЛ

В нашем случае относительная погрешность оценки влажности с использованием нейронных сетей не более 2%. Аналитические модели вида (3.53) лежат в основе работы интеллектуального датчика влажности материала [17, 34]. Достоинство применения интеллектуального датчика влажности с использованием нейронных сетей состоит в том, что он дает возможность одновременного получения и обработки информации, поступающей с физических датчиков [210]. Это дает возможность значительно ускорять процесс обработки данных даже при большом числе внутренних слоев и связей между нейронами. Также, построенная нейронная сеть устойчива к действию дестабилизирующих факторов в некоторых связях, т.к. роль поврежденных связей берут на себя исправные. Важным свойством нейронной сети является способность к самообучению, за счет накопления и обобщения статистических данных в процессе ее функционирования [186].

Модель оценки влажности пастообразного материала в виде нейронной сети дает погрешность превышающую допустимую задаваемую технологическим регламентом точность измерения влажности материала на выходе k-ой камеры СВЛ ($\varphi^{к}_{k}$<1%). В связи с этим предлагается применять алгоритм, основанный на

методе Демпстера-Шафера, для определения на основании экспертных оценок мер доверия к требуемой влажности материала на выходе СВЛ в зависимости от диапазонов значений влажности материала в n-ой и $(n+1)$-ой контролируемых камерах [209].

3.6 Определение меры доверия к качеству материала на выходе вальцеленточной сушильной установки

Необходимым условием функционирования ИДВ является определение меры доверия $m(\varphi_k^{\text{к}})$ к качеству получаемого на выходе СВЛ материала. В связи с тем, что значение $\varphi_k^{\text{к}}$ влажности материала на выходе сушильной установки по абсолютной величине не может превышать 1%, оценка ее по аналитическим моделям вида (3.53) нецелесообразна. В следствие чего используется метод Демпстера-Шафера, заключающийся в использовании накопленного опыта экспертов, предлагающих оценки качества получаемого материала ($G_n^{\text{х}}, G_n^{\text{уд}}, G_n^{\text{пл}}, G_{n+1}^{\text{х}}, G_{n+1}^{\text{уд}}, G_{n+1}^{\text{пл}}$, здесь верхние индексы означают: х – хорошую влажность; уд – удовлетворительную влажность; пл – плохую влажность, нижние индексы обозначают номер соответствующей камеры) при попадании измеренных значений влажностей пастообразного материала в контролируемых камерах в нормированные диапазоны. По методу Демпстера-Шафера определяются числовые оценки двух различных свидетельств $m_1(\mathcal{W})$ и $m_2(\mathcal{D})$, и нового подмножества $\mathcal{V}$ – $m_3(\mathcal{V})$. Значение оценки $m_3(\mathcal{V})$ получают следующим образом:

$$m_3(\mathcal{V}) = \frac{\sum\limits_{\mathcal{W}\cap\mathcal{D}=\mathcal{V}} m_1(\mathcal{W})m_2(\mathcal{D})}{1 - \sum\limits_{\mathcal{W}\cap\mathcal{D}=\varnothing} m_1(\mathcal{W})m_2(\mathcal{D})}, \qquad (3.55)$$

где $\mathcal{W}$ – множество значений влажности материала φ_n; $\mathcal{D}$ – множество значений влажности материала φ_{n+1}. Оценки мер доверии к требуемой выходной влажности материала $m_3(\mathcal{V})$ рассчитываются для каждого нормированного диапазона [159].

В качестве примера рассмотрим определение оценок мер доверия, достижения требуемой влажности материала на выходе сушильной установки вальцеленточного типа. Экспертами для двух контролируемых камер ($n=2,\ n+1=3$) выделены три нормированных диапазона и назначены меры доверия для каждого диапазона:

– к тому, что процесс сушки закончится с хорошим результатом, т.е. что влажность материала на выходе СВЛ будет не более 0,5% ($\varphi^{\text{к}}_{k=5} < 0{,}5\%$) – событие $\mathcal{A}$;

– к тому, что процесс закончится с удовлетворительным результатом, т.е. что влажность материала на выходе СВЛ будет в пределах от 0,5 до 1% ($0{,}5\% \le \varphi^{\text{к}}_{k=5} \le 1\%$) – событие $\mathcal{B}$;

– к тому, что процесс сушки закончится с плохим результатом, т.е. что влажность материала на выходе СВЛ будет более 1% ($\varphi^{\text{к}}_{k=5} > 1\%$) – событие C.

– к тому, что наступят иные события, например проявится неясная ситуация при наличии взаимоисключающих событий – ситуация $\mathcal{Q}$ [209].

Назначенные экспертами меры доверия приведены в таблице 3.1.

Рассмотрим пример, в котором влажность материала в n-ой камере равна $\varphi_n = 41\%$, а влажность в $(n+1)$-ой камере есть $\varphi_{n+1} = 8{,}7\%$. В этом случае при расчете меры доверия к требуемому качеству материала на выходе сушильной установки участвуют такие подмножества:

$$m_1\{\mathcal{A}\} = 0{,}4;\quad m_1\{\mathcal{B}\} = 0{,}43;\quad m_1\{C\} = 0{,}15;\quad m_1\{\mathcal{Q}\} = 0{,}02;\ \text{и}$$

$$m_2\{\mathcal{A}\} = 0{,}85;\quad m_2\{\mathcal{B}\} = 0{,}1;\quad m_2\{C\} = 0{,}04;\quad m_2\{\mathcal{Q}\} = 0{,}01.$$

Таблица 3.1

Оценки экспертов

Диапазон влажности, %	Обозначение диапазона	Процесс сушки закончится с хорошим результатом $m(\mathcal{A})$	Процесс сушки закончится с удовлетвори-тельным результатом $m(\mathcal{B})$	Процесс сушки закончится с плохим результатом $m(C)$	Иные возможные ситуации $m(\mathcal{Q})$
Камера $n=2$			$m_1(\mathcal{W})$		
< 40	$G^{\text{х}}_{n=2}$	0,65	0,27	0,07	0,01
от 40 до 50	$G^{\text{уд}}_{n=2}$	0,4	0,43	0,15	0,02
>50	$G^{\text{пл}}_{n=2}$	0,15	0,32	0,5	0,03
Камера $n+1=3$			$m_2(\mathcal{D})$		
< 14	$G^{\text{х}}_{n+1=3}$	0,85	0,1	0,04	0,01
от 14 до 18	$G^{\text{уд}}_{n+1=3}$	0,3	0,54	0,14	0,02
>18	$G^{\text{пл}}_{n+1=3}$	0,05	0,22	0,7	0,03

Таблица 3.2

Объединение свидетельств m_1 и m_2

m_1	m_2	m_3
1	2	3
$m_1\{\mathcal{A}\}=0{,}4$	$m_2\{\mathcal{A}\}=0{,}85$	$m_3\{\mathcal{A}\}=0{,}34$
$m_1\{\mathcal{B}\}=0{,}43$	$m_2\{\mathcal{A}\}=0{,}85$	$m_3\{\varnothing\}=0{,}3655$
$m_1\{C\}=0{,}15$	$m_2\{\mathcal{A}\}=0{,}85$	$m_3\{\varnothing\}=0{,}1275$
$m_1\{\mathcal{Q}\}=0{,}02$	$m_2\{\mathcal{A}\}=0{,}85$	$m_3\{\mathcal{A}\}=0{,}017$
$m_1\{\mathcal{A}\}=0{,}4$	$m_2\{\mathcal{B}\}=0{,}1$	$m_3\{\varnothing\}=0{,}04$
$m_1\{\mathcal{B}\}=0{,}43$	$m_2\{\mathcal{B}\}=0{,}1$	$m_3\{\mathcal{B}\}=0{,}043$
$m_1\{C\}=0{,}15$	$m_2\{\mathcal{B}\}=0{,}1$	$m_3\{\varnothing\}=0{,}015$
$m_1\{\mathcal{Q}\}=0{,}02$	$m_2\{\mathcal{B}\}=0{,}1$	$m_3\{\mathcal{B}\}=0{,}002$
$m_1\{\mathcal{A}\}=0{,}4$	$m_2\{C\}=0{,}04$	$m_3\{\varnothing\}=0{,}016$
$m_1\{\mathcal{B}\}=0{,}43$	$m_2\{C\}=0{,}04$	$m_3\{\varnothing\}=0{,}0172$
$m_1\{C\}=0{,}15$	$m_2\{C\}=0{,}04$	$m_3\{C\}=0{,}006$
$m_1\{\mathcal{Q}\}=0{,}02$	$m_2\{C\}=0{,}04$	$m_3\{C\}=0{,}0008$
$m_1\{\mathcal{A}\}=0{,}4$	$m_2\{\mathcal{Q}\}=0{,}01$	$m_3\{\mathcal{A}\}=0{,}004$
$m_1\{\mathcal{B}\}=0{,}43$	$m_2\{\mathcal{Q}\}=0{,}01$	$m_3\{\mathcal{B}\}=0{,}0043$
$m_1\{C\}=0{,}15$	$m_2\{\mathcal{Q}\}=0{,}01$	$m_3\{C\}=0{,}0015$
$m_1\{\mathcal{Q}\}=0{,}02$	$m_2\{\mathcal{Q}\}=0{,}01$	$m_3\{\mathcal{Q}\}=0{,}0002$

Случай объединения множеств m_1 и m_2 для двух камер без учета нормировки приведен в таблице 3.2.

Знаменатель формулы (3.55) имеет вид $1 - \sum_{\mathcal{W} \cap \mathcal{D} = \varnothing} m_1(\mathcal{W}) m_2(\mathcal{D}) = 0{,}4188$, поэтому имеем следующие оценки мер доверия, полученные при объединении двух подмножеств: $m_3\{\mathcal{A}\} = 0{,}863$; $m_3\{\mathcal{B}\} = 0{,}119$; $m_3\{C\} = 0{,}017$; $m_3\{\mathcal{Q}\} = 0{,}001$. В результате, оценка меры доверия к тому, что процесс сушки закончится с хорошим результатом (событие $\mathcal{A}$) равна 0,863; к тому, что процесс сушки закончится с удовлетворительным результатом (событие $\mathcal{B}$) – 0,119; к тому, что процесс сушки закончится с плохим результатом (событие C) равна 0,017; мера доверия к наступлению иных возможных ситуаций – 0,001. Подобным образом рассчитываются оценки мер доверия и для других вариантов получаемых значений влажности материала в контролируемых камерах.

Итерационная процедура определения мер доверия к требуемому качеству материала на выходе вальцеленточной сушильной установки представима в виде:

$$m(\varphi_k^{\text{к}}) = \text{Алг}_{\text{ДШ}}(\varphi_n, \varphi_{n+1}, \text{э}), \tag{3.56}$$

где $\text{Алг}_{\text{ДШ}}$ – алгоритм Демпстера-Шафера; э – численные оценки экспертов [209].

Таблица 3.3

Оценки мер доверия к требуемой влажности материала на выходе вальцеленточной сушильной установки

№ п/п	Возможные ситуации	$m(\mathcal{A})$	$m(\mathcal{B})$	$m(C)$	$m(\mathcal{Q})$	$\varphi_{k=5}^{\text{к}}$
1	$(G_{n=2}^{\text{пл}}, G_{n+1=3}^{\text{пл}})$	0,027	0,178	0,793	0,002	2,34
2	$(G_{n=2}^{\text{уд}}, G_{n+1=3}^{\text{пл}})$	0,123	0,416	0,459	0,002	1,77
3	$(G_{n=2}^{\text{пл}}, G_{n+1=3}^{\text{уд}})$	0,169	0,579	0,25	0,002	1,51
4	$(G_{n=2}^{\text{х}}, G_{n+1=3}^{\text{пл}})$	0,29	0,386	0,322	0,002	1,42
5	$(G_{n=2}^{\text{уд}}, G_{n+1=3}^{\text{уд}})$	0,325	0,61	0,065	0,001	1,08
6	$(G_{n=2}^{\text{х}}, G_{n+1=3}^{\text{уд}})$	0,555	0,412	0,033	0,0005	0,96
7	$(G_{n=2}^{\text{пл}}, G_{n+1=3}^{\text{х}})$	0,705	0,174	0,12	0,001	0,64
8	$(G_{n=2}^{\text{уд}}, G_{n+1=3}^{\text{х}})$	0,862	0,118	0,02	0,0005	0,48
9	$(G_{n=2}^{\text{х}}, G_{n+1=3}^{\text{х}})$	0,942	0,051	0,0065	0,0002	0,35

В таблице 3.3 представлены все возможные ситуации для пяти камерной сушильной установки вальцеленточного типа; здесь в последней графе приведены измеренные в лабораторных условиях влажности материала $\varphi^{\text{к}}_{k=5}$ на выходе СВЛ.

Таблица 3.3 предназначена для оперативного определения оценки меры доверия к требуемому качеству материала на выходе СВЛ [209].

3.7 Информационная модель интеллектуальной информационно-управляющей системы тепло-технологическими аппаратами

Одним из этапов проектирования ИИУС ТТА является решение задачи создания информационной модели ИИУС на основе анализа предметной области. При этом должны учитываться особенности решаемых ИИУС задач, используемые технологии интеллектуализации синтеза решения задач управления режимами ТТА, методы, алгоритмы и модели.

Методика решения задачи построения информационной модели ИИУС ТТА заключается в следующем.

1. Определяются на этапе анализа ТТА множества: объектов управления – $M_{\text{ТТА}} = \bigcup_{\eta} M^{\text{О}}_{\eta}$ (2.24), составляющих ТТА; класс задачи управления на МСФ SF; режимы их работы RR; цели управления CU и соответствующие им функционалы F.

2. Формулируются постановки задач и определяются стратегии их решения на МСФ.

2. Идентифицируются, для каждого состояния функционирования, математические модели объектов, пригодные для решения задач.

3. Идентифицируется морфологическая модель $M^{\text{О}}_{\eta}$ (2.24), лежащая в основе ER– модели базы данных.

4. Проводится анализ и синтез управляющих воздействий на МСФ для каждого объекта управления входящего в состав ТТА.

5. На основании функциональных особенностей определяется тип, структура ИИУС ТТА и множество типовых функциональных программных модулей подсистем $\mathcal{PM}^{\text{У}}$ (2.31) и $\mathcal{PM}^{\text{И}}$ (2.32).

6. Формулируются критерии $\mathcal{KR}^{\text{И}}$, $\mathcal{KR}^{У}$ и ограничения $\mathcal{OGR}^{\text{И}}$, $\mathcal{OGR}^{У}$ задачи структурного синтеза соответствующих подсистем (2.35), (2.36).

7. Создаются функциональные модели подсистем $M_{\text{ИУПС}}$ (2.25), $M_{\text{ИИПС}}$ (2.26), $M_{\text{ИИ}}$ путем решения задачи структурного синтеза, для чего определяются модели $M_{\text{БД}}$, $M_{\text{БЗ}}$ – баз данных и знаний, множества: информационных элементов технических средств $\mathcal{IE}^{У}$ (2.33), $\mathcal{IE}^{И}$ (2.34), алгоритмов $\mathcal{A}^{У}$ (2.29), $\mathcal{A}^{\text{И}}$ (2.30), и программного обеспечения $\mathcal{IS} = \langle \mathcal{FC}, \mathcal{P}_0 \rangle$, создаваемой ИИУС ТТА.

8. Формируются информационные каналы связи $S_{\text{СВ}}$ согласно полученным моделям.

9. Оценивается техническая эффективность варианта проектного решения архитектуры ИИУС ТТА.

ИИУС ТТА должна обеспечивать: работу в локальных и глобальных сетях, регистрацию аналоговых и цифровых сигналов измерительных датчиков при вводе информации, дискретизацию управляющих сигналов, поддержку работы с различными категориями пользователей (экспертов-консультантов, разработчиков системы, инженеров-когнитологов, операторов или инженеров КИП, которые имеют различные информационные каналы доступа к системе с целью защиты ее информации), хранение необходимой информации, анализ и синтез оптимального управления режимами ТТА, отображение информации в удобном для пользователей виде, имитационное моделирование процессов, идентификацию состояния функционирования и реализацию интеллектуальных, логических и вычислительных процедур. Для реализации функций ИИУС ТТА

при проектировании выделяются две основные подсистемы: информационно-управляющая подсистема и информационно-измерительная подсистема, а также интеллектуальный интерфейс, базы данных и знаний [24]. Построение ИИУС ТТА, инвариантной различным объектам управления, основано на использовании типовых функциональных программных модулях.

Оперативная разработка типовых функциональных программных модулей управления динамическими объектами ИУПС выполняется на основе модулей экспертной системы «Энергосберегающего управления динамическими объектами» [268, 202, 37] и известных методов: синтезирующих переменных [181, 261], анализа и синтеза оптимального управления, описания объектов на множестве состояний функционирования [160], искусственного интеллекта [143, 174, 203, 63, 133, 192, 217, 182, 159] и т.д., и созданного:

– математического обеспечения, формирующего базы знаний [34], включающего представление объектов на множестве состояний функционирования [31, 32, 15], анализа и синтеза оптимального управления, в том числе при наличии возмущающих воздействий, действующих по каналам управления и измерения [18], и различных стратегий управлений [14, 85, 21] , нечетких множеств и нечетких выводов [209], нейронных сетей [210];

– алгоритмического обеспечения: прогнозирования помех в канале измерения [38], фильтрации помех в канале измерения [18], синтеза энергосберегающего управления с использованием нечеткой логики [24], синтеза энергосберегающего помехоустойчивого регулятора [27], мягкой и жесткой коррекции энергосберегающего управления динамическими объектами при наличии помех [14], оперативного синтеза оптимального управления для различных состояний функционирования сушильной установки [15], адаптивного управления, робастного управления [45];

– программного обеспечения, осуществляющего математическую обработку информации и реализующего разработанные алгоритмы;

– технического обеспечения, реализующего интеллектуальные процедуры оценки в реальном времени влажности материала в процессе его сушки.

ИИУС ТТА позволяет синтезировать управляющее воздействие в двух основных режимах работы тепло-технологического оборудования ТТА: «пуск» и «процесс». Поэтому множество типовых функциональных программных модулей $\mathcal{PM}^{У}$ может содержать пересекающиеся подмножества модулей ИУПС и ИИПС, обеспечивающих работу каждого режима работы. Общими для подсистем могут являться:

– модуль интеллектуального интерфейса ИИ, обеспечивающий взаимодействие систем ввода/вывода информации ИИУС ТТА;

– модуль супервизора СВ – главный модуль ИИУС ТТА, управляющий процессами обработки, передачи и хранения информации в ИИУС ТТА, а также работой технических и программных средств.

В состав модуля ИИ входит:

– когнитивная графика, позволяющая визуализировать исследуемый процесс и результаты поиска решений за счет организации взаимосвязей между изображениями, отражающимися на экране монитора с когнитивными процессами образного мышления;

– интегрированная среда разработки, которая позволяет разработчику вносить коррективы в функциональные программные модули и базу знаний;

– лингвистический процессор, который реализует интеллектуальный диалог пользователей с ИИУС ТТА на ограниченном естественном языке. Важной операцией интеллектуального диалога является функция внесения необходимой ИИУС ТТА информации в базу данных.

К основным типовым функциональным программным модулям ИУПС относятся:

– модуль идентификации состояния функционирования ИСФ, позволяющий оперативно определять текущее значение переменной состояния функционирования;

– модуль целей ЦУ , синтезирующий цель управления;

– модуль идентификации стратегии ИС, определяющий стратегию способа реализации управления в управляющее воздействие с учетом МСФ;

– модуль нечеткого логического вывода НЛВ, определяющий управляющее воздействие в условиях неопределенности;

– модуль определения мер доверия МД;

– модуль синтеза оптимального управления СОУ, реализующий интеллектуальный синтез оптимального управления на МСФ;

– модуль анализа оптимального управления АОУ, позволяющий получать условия существования решения задачи оптимального управления, определять возможные виды функций управляющих воздействий, вычислять границы областей существования видов функций, получать соотношений для расчета параметров функций управляющих воздействий;

– модуль идентификации математических моделей ИММ, позволяющий идентифицировать модель, пригодную для управления;

– модуль имитационного моделирования ИМ, предназначенный для проверки эффективности синтезированного управляющего воздействия;

– модуль машины вывода МВ, определяющий траекторию пути на интегрированном графе технологии синтеза оптимального управления

Структурная схема взаимодействия функциональных программных модулей ИУПС ИИУС ТТА приведена на рис. 3.8.

К основным типовым функциональным программным модулям информационно-измерительной подсистемы ИИУС ТТА относятся:

– модуль опроса датчиков (МОД);

– модуль реализации измерительных процедур (МРИП).

Структурная схема взаимодействия функциональных программных модулей ИИПС ИИУС ТТА представлена на рис.3.9

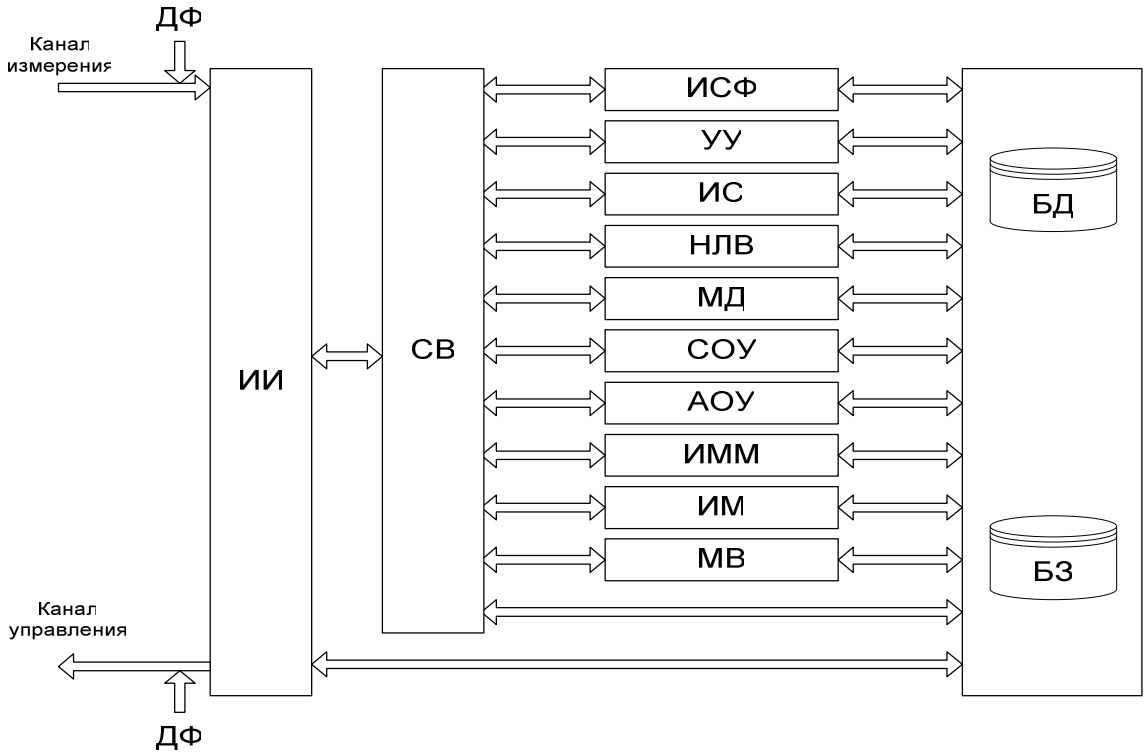


Рисунок 3.8 Структурная схема взаимодействия функциональных программных модулей ИУПС ИИУС ТТА

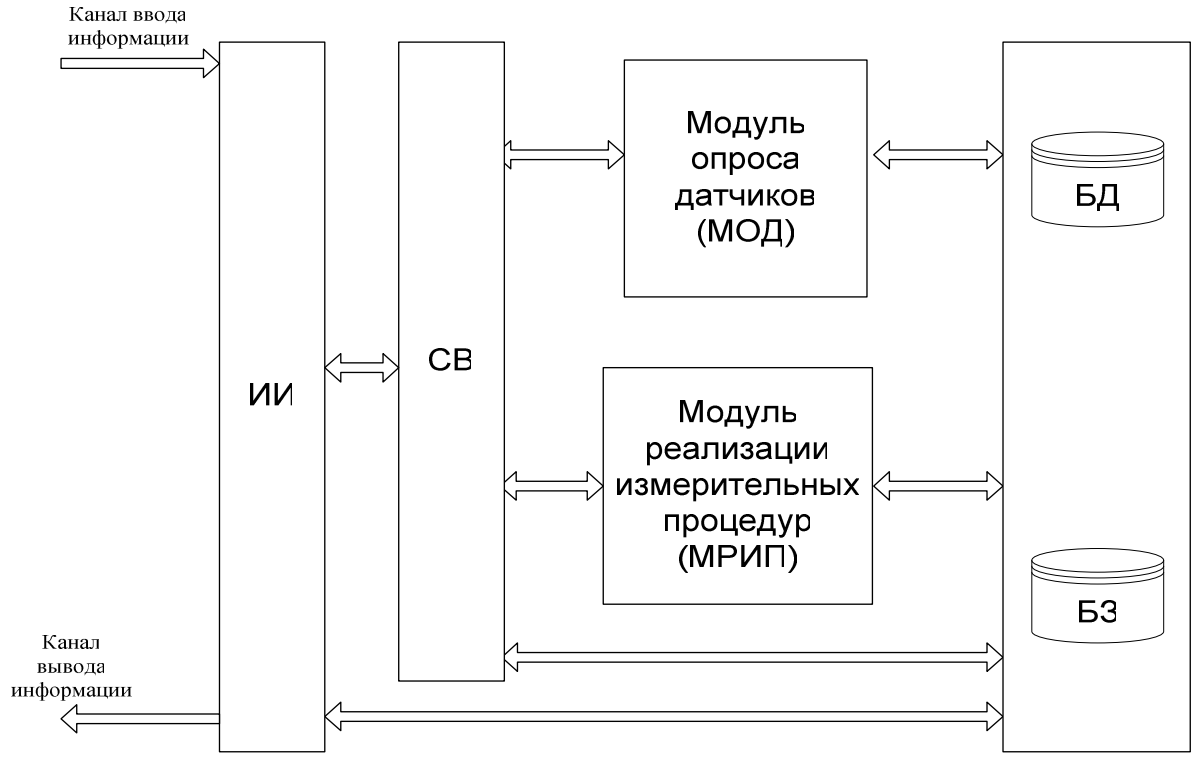


Рисунок 3.9 Структурная схема взаимодействия функциональных программных модулей ИИПС ИИУС ТТА

Вид информационной модели ИИУС ТТА определяется путем решения задачи (2.40)–(2.52). На основе полученной информационной модели разрабатывается архитектура ИИУС ТТА.

3.8 Задача структурного построения программного обеспечения интеллектуального датчика влажности движущегося пастообразного материала в вальцеленточной сушильной установке

Возможности практического решения задач структурного построения относятся к классу NP-полных задач и описываются в теории сложности задач выбора Известно, что даже задачи умеренного размера решаются только с определенной долей приближения. Поэтому задачи структурного построения предлагается решать, используя (эвристические) методы [197]. Эти методы при приемлемых затратах вычислительных ресурсов приводят к результатам, близким к оптимальным,. Рассмотрим структурное построение программного обеспечения на примере небольшой информационно-измерительной системы – интеллектуальный датчик влажности (ИДВ). ИДВ позволяет проводить косвенные измерения влажности материала непосредственно в процессе сушки в реальном времени [44]. В основе функционирования ИДВ лежат нейронные сети.

Важным этапом проектирования ИДВ является создание программного обеспечения, позволяющего информационно-измерительной системе обладать следующими свойствами: слабая связанность элементов (декомпозицию следует производить так, чтобы поток информации через связи был минимальным); тестируемость (возможность установления факта правильного функционирования); диагностируемость (возможность нахождения неисправностей); простота обслуживания и эксплуатации (минимальные требования к квалификации персонала); защищенность от несанкционированного доступа; экономичность (экономическая эффективность в процессе функционирования); модифицируемость; функциональная расширяемость;

возможность изменения конфигурации; максимальная длительность жизненного цикла (без существенного морального старения); минимальное время на пуск-наладку [98].

При проектировании программного и информационного обеспечения в качестве основных модулей ИДВ можно выделить следующие интеллектуальный интерфейс (ИИ), супервизор (СВ), модуль опроса датчиков (МОД) и модуль реализации измерительных процедур (МРИП). Функционирование ИДВ базируется на использовании баз данных (БД) и знаний (БЗ) (см. параграф 3.9 и рис. 3.8).

Для реализации работы ИДВ используются ряд алгоритмов, которые требуются разместить по модулям таким образом, чтобы проектируемая ИИС обладала вышеприведенными свойствами.

Решать задачу оптимизации структурного построения предлагается с использованием эволюционных методов, в частности генетических алгоритмов. В качестве исходных данных задачи задаются таблица вариантов распределения алгоритмов по модулям (см. табл. 3.4) и граф взаимодействия алгоритмов, посредством информационных элементов (см. рис. 3.10). В таблице 1 приведены различные варианты распределения алгоритмов по модулям. Например, алгоритм предварительного расчета входных значений может размещаться в следующих модулях ИИ, СВ, МОД, МРИП.

Постановку задачи можно сформулировать следующим образом: задаются в качестве исходных данных таблица вариантов распределения алгоритмов по модулям (табл. 3.4) и графа взаимодействия алгоритмов, посредством информационных элементов (рис. 3.10), вводятся ограничения на однократность включения алгоритма в программные модули (3.57), на дублирование занимаемой памяти информационными элементами (3.58), на сложность информационного интерфейса между отдельными модулями (3.59), формируется целевая функция. Требуется определить с использованием генетического алгоритма оптимальное размещение алгоритмов по модулям.

Таблица 3.4.

Варианты распределения алгоритмов по модулям

Номер алгоритма	Наименование алгоритма	Наименование модуля
1	Предварительный расчет входных значений	ИИ, СВ, МОД, МРИП
2	Нормирование входных значений	ИИ, СВ, МОД, БД, БЗ
3	Работа с когнитивной графикой	ИИ
4	Денормирование рассчитанных выходных значений	ИИ, СВ, МОД, МРИП
5	Функционирование базы данных	СВ
6	Функционирование базы знаний	ИИ
7	Опрос датчиков	МОД
8	Реализация измерительных процедур	МРИП
9	Функционирование лингвистического процессора	ИИ
10	Реализация работы технических средств	СВ, МОД
11	Реализация работы программных средств	СВ, МОД
12	Принятие решений в случае отказов датчиков	ИИ, СВ, МОД, МРИП, БЗ
13	Реализация различных моделей измерительных процедур	БЗ, МРИП

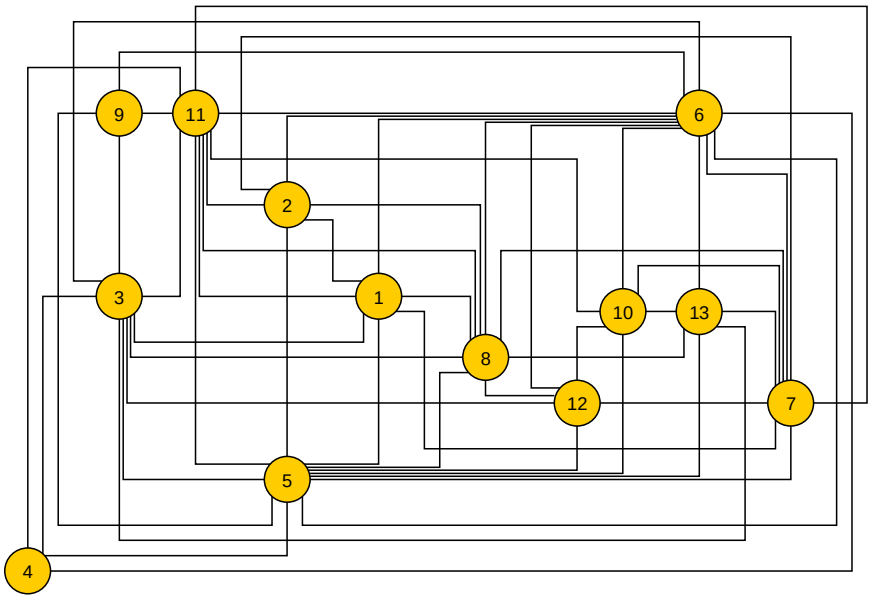


Рисунок 3.10 Граф взаимодействия алгоритмов, посредством информационных элементов

Решение задачи предлагается проводить по предложенной в [197] методике, состоящей их следующих этапов.

1. Формируется вектор-строка *P* генов распределения алгоритмов по модулям.

2. Описывается матрица *D* связей, взаимодействия алгоритмов посредством информационных элементов.

3. Создаётся матрица принадлежности *i*-го алгоритма *j*-му модулю – матрица альтернатив *X*. Значения матрицы *X* связаны с вектором *P* логическими функциями ограничений:

– на однократность включения *i*-го алгоритма в совокупность программных модулей

$$\sum_{j=1}^{m} x_{i,j} = 1, \tag{3.57}$$

– на дублирование занимаемой памяти *k*-м информационным элементом

$$\sum_{l=1}^{n} y_{kl} = 1, \tag{3.58}$$

– на сложность информационного интерфейса между отдельными модулями

$$\sum_{k=1}^{d} \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{j'=j+1}^{m} z_{kj} z_{kj'} \le M \quad , \tag{3.59}$$

где *m* – количество модулей, *n* – количество алгоритмов, *d* – количество информационных элементов, *M* – максимально допустимое число информационных элементов, являющихся общими для всех модулей. Данное ограничение вводится с целью минимизации информационных связей между модулями. Для формализации задачи здесь обозначено: $x_{i,j}$ – принадлежность *i*-го алгоритма *j*-му модулю, y_{kl} – принадлежность *k*-го информационного элемента *l*-ой области памяти, $z_{k,j}$ – вхождение *k*-го информационного элемента в *j*-ый модуль, таким образом, $z_{kj} z_{kj+1}$ – отражает взаимосвязь в процессе работы алгоритмов *j*-го текущего модуля с последующим по *k*-му информационному элементу.

4. Формируются матрицы $Y=X \times D$ и $W=Y \times X^T$. Число внутренних связей равно сумме элементов главной диагонали матрицы *W*. Исходя из задачи, нужно увеличить число внутренних связей, так как это означает уменьшение числа внешних связей. Эта функция является целевой и подвергается максимизации с помощью генетического алгоритма. Целевая функция является суммой элементов

главной диагонали матрицы *W* и подлежит максимизации посредствам изменения значений генов вектора *P* с помощью генетических алгоритмов.

Согласно приведенной методике сформируем вектор-строку *P* (рис. 3.11), число её элементов соответствует числу распределяемых алгоритмов (*n*=13). Здесь неизменяемые в результате действия ограничений ячейки с *i* = 3, 5, 6, 7, 8, 9.

i	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*
P	2	2	1	2	2	1	3	4	1	2	2	1	4

Рисунок 3.11. Вектор-строка *P*

Элементы *P* являются генами, их значения подбираются в процессе решения для достижения оптимального значения целевой функции. Диапазон изменения ограничен. Значения элементов (номер) указывают на принадлежность соответственного алгоритма к модулю с номером, который содержится в ячейке. Модули пронумерованы следующим образом: 1– ИИ, 2–СВ, 3–МОД, 4–МРИП, 5–БЗ,6–БД.

Далее формируем матрицу *X* (см. табл. 3.5). Она имеет размер *n*×*m*. Если *i*-ый алгоритм содержится в *j*-том модуле, то в ячейке *i, j* стоит единица, в противном случае ноль. Данные берутся согласно вектору-строке *P*. Таблица строится в Excel автоматически с помощью логических функций (функция ЕСЛИ). Служебная строка СУММ показывает, что сумма соответствующих столбцов равна единице – ограничение на принадлежность алгоритма только одному модулю. С помощью служебного столбца СУММ (сумма соответствующих строк) можно видеть и контролировать (ограничивать) наполняемость модулей.

Заполним матрицу *D* (*n*×*n*), которая показывает, как связаны между собой алгоритмы (связь несимметричная, направленная). Если модули связаны, то на пересечении соответствующей строки и столбца стоит единица, в противном случае – ноль. Матрица формируется исходя из исходных данных задачи.

Также используем служебные матрицы P^T и X^T, представляющие собой транспонированные матрицы P и X. Матрица Y определяется путем произведения матриц X на D ($Y = X \times D$).

Таблица 3.5

Принадлежность *i*-го алгоритма в *j*-му модулю

X	*i*													
j	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	СУММ
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	4
2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	5
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СУММ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Таблица 3.6

Связь алгоритмов между собой

D	*i*												
i	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*
1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0
3	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1
4	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Матрица W представляет собой произведение матриц Y и X^T

$$W = Y \times X^T .$$

Целевая функция *f* является суммой элементов главной диагонали матрицы *W* и подлежит максимизации посредствам изменения значений генов вектора *P* с помощью генетических алгоритмов.

$$f = \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i=j}}^{13} W_{ij} .$$

Для реализации процесса подбора подходящей комбинации используются следующие настройки. Размер популяции: 50. Длина хромосомы: 8 бит. Тип хромосом: непрерывные. Вероятность скрещивания: 0,9. Вероятность мутации: 0,01. Степень обновления: 0,98. Стратегия элитаризма: ON. Оператор разнообразия: ON.

Таблица 3.7

Результат распределения алгоритмов по модулям

Номер алгоритма	Наименование алгоритма	Наименование модуля
1	2	3
1	Предварительный расчет входных значений	СВ
2	Нормирование входных значений	СВ
3	Работа с когнитивной графикой	ИИ
4	Денормирование рассчитанных выходных значений	СВ
5	Функционирование базы данных	СВ
6	Функционирование базы знаний	ИИ
7	Опрос датчиков	МОД
8	Реализация измерительных процедур	МРИП
9	Функционирование лингвистического процессора	ИИ
10	Реализация работы технических средств	СВ
11	Реализация работы программных средств	СВ
12	Принятие решений в случае отказов датчиков	ИИ
13	Реализация различных моделей измерительных процедур	МРИП

Требуется найти: максимум функции *f*.

Для решения поставленной задачи используются следующие ограничения:

– ограничение диапазона для хромосом

$$1 \le P_i \le 6, i = \overline{1,13};$$

– ограничение на единственность алгоритмов

$$\sum_{i=1}^{6} X_i = 1, i = \overline{1,13};$$

– ограничения размещения для конкретных алгоритмов (из условия):

$$1 \le P_1 \le 4,\ 1 \le P_4 \le 4,\ 2 \le P_{10} \le 3,\ 2 \le P_{11} \le 3,\ 1 \le P_{12} \le 5,\ 4 \le P_{13} \le 5.$$

Решение задачи распределения алгоритмов по функциональным программным модулям в результате оптимизации с использованием генетического алгоритма приведено в таблице 3.7.

В процессе оптимизации построения программного обеспечения ИДВ с использованием генетического алгоритма находится решение, не противоречащее здравому смыслу размещения алгоритмов в программных модулях. Таким образом, подобный подход можно применять для проектирования информационного и программного обеспечения, как информационно-измерительных, так и информационно-управляющих систем, имеющих в своем составе большое количество модулей и алгоритмов.

Выводы по третьей главе

1. Проведен анализ состояния вопросов математического моделирования, представляющего объект на множестве состояний функционирования (МСФ), и решения задач энерго- ресурсосберегающего оптимального управления процессами нагрева в ТТА.

2. Разработан алгоритм идентификации моделей динамики объектов составляющих ТТА. Основным критерием выбора подходящей модели берется минимум максимального значения абсолютной погрешности модели.

3. Идентифицирована математическая модель процесса «Пуск» многокамерной СВЛ с учетом множества состояний функционирования. Она не содержит коэффициентов полученных опытным путем и позволяет учесть

действие дестабилизирующих факторов со стороны соседних камер. В результате данная модель является пригодной для алгоритмизации синтеза управляющих воздействий минимизирующих ресурсо– потребление в реальном масштабе времени.

4. Приведены постановки задач управления режимом «Процесс» в вальцеленточной сушильной установки, позволяющие минимизировать потери качества производимого материала и производительности процесса его сушки.

5. Получены модели оценки влажности материала в контролируемых камерах СВЛ, основанные на нейронных сетях, пригодные для выработки управляющих воздействий в реальном масштабе времени. Использование этих моделей в ИИУС СВЛ позволяет снижать потери качества выпускаемого материала. Относительная погрешность оценки влажности пастообразного материала по моделям не превышает 2%. Модели отличаются от существующих определением влажности движущегося пастообразного материала в различных точках по длине сушильной установки. Они учитывают изменения управляющих и возмущающих воздействий.

6. Предложен алгоритм, основанный на методе Демпстера-Шафера, для определения на основании экспертных оценок мер доверия к требуемой влажности материала на выходе СВЛ в зависимости от диапазонов значений влажности материала в n-ой и $(n+1)$-ой контролируемых камерах.

7. Разработана методика решения задачи построения информационной модели ИИУС ТТА. Определен состав и взаимодействие типовых программных функциональных модулей ИИУПС и ИИПС инвариантных различным ТТА. Типизация требуется для оперативного построения рабочих прототипов ИИУС ТТА.

8. Решена задача структурного построения программного обеспечения интеллектуального датчика влажности с использованием генетического алгоритма на основании сформулированных критериев и ограничений.

4 АНАЛИЗ И СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МНОЖЕСТВЕ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Одной из важнейших составляющих ИИУС ТТА является математическое обеспечение, лежащее в основе базы знаний и большинства ее алгоритмов. Выделим основные этапы его создания. Это – полный анализ энерго- или ресурсосберегающего управления на множестве состояний функционирования, в том числе и расширенный анализ с учетом дестабилизирующих факторов. Интеллектуальный синтез управляющих воздействий в режиме «Пуск», а также анализ и интеллектуальный синтез управляющих воздействий в режиме «Процесс» на множестве состояний функционирования.

4.1 Полный анализ энерго- или ресурсосберегающего управления в режиме «Пуск» на множестве состояний функционирования

Исследования режимов «Пуск» показывают, что модели динамики технологического оборудования могут быть представлены в кусочно-линейной форме, одна или несколько стадий, которых описываются инерционными объектами первого порядка (см. [52, 149, 235, 244, 169, 240]):

$$\dot{z} = a_h z(t) + b_h u(t), \qquad (4.1)$$

где a_h и b_h – параметры объекта управления в состоянии h. Из литературных источников [237, 238, 250] известно, что модели динамики двигателей часто описываются этим объектом.

Предлагаемая методика полного анализа энерго- и ресурсосберегающего управления на МСФ [16, 20] включает следующие этапы: необходимо

1) получить условия, при которых решения задач управления существуют;

2) определить все возможные виды функций управления $u_h(t), \quad h \in H$;

3) ввести нормированную задачу;

4) ввести синтезирующие переменные;

5) построить и провести анализ областей существования видов функций управления в пространстве синтезирующих переменных нормированной задачи;

6) разработать алгоритмы расчета параметров функций управления.

Метод, основанный на использовании синтезирующих переменных, позволяет ввести синтезирующий вектор, размерность которого значительно меньше размерности массива исходных данных задачи энерго- и ресурсосберегающего управления, и который однозначно определяет вид и параметры функции управления. Использование синтезирующих переменных в ИИУС ТТА позволяет без определения вида функций управления лишь только по значениям массива исходных данных оперативно проверять имеет ли задача (2.8)–(2.10) решение для функционала (2.11), или не имеет.

В состоянии $h \in H$ условия управляемости применительно к задаче (2.8)–(2.11) определяются следующим образом: решение задачи (2.11) в состоянии h на интервале времени $[\theta_{0h}, t_{kh}]$ существует, если существует $u_h(t)$, которое удовлетворяет одновременно ограничению (2.10) и условию достижения конечного состояния

$$\int_{\theta_h}^{t_{kh}} e^{a_h(t_{kh}-t)} u_h(t)dt = \frac{1}{b_h}(z_{kh} - z_{oh}\ e^{a_h(t_{kh}-\theta_h)}). \qquad (4.2)$$

Лемма 4.1. Если в задаче (2.8)–(2.11) минимизируемый функционал есть «затраты энергии» вида (1.1), 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:

$u^*(t) \in (\mu(u_{\text{гр}}) \vee \mu_c(\text{exp}) \vee \mu_{н}(\text{exp}, u_{гр}) \vee \mu_{н}(u_{г\text{р}}, \text{exp}))$, здесь:

– множество $\mu(u_{гр})$ – постоянных функций, т.е. $u^*(t) = const$;

– множество $\mu_c(\text{exp})$ – строго монотонных экспоненциальных функций;

– множество $\mu_{н}(\text{exp}, u_{\text{гр}})$ – нестрого монотонных функций: убывающая (возрастающая) экспонента до времени переключения и постоянная функция после времени переключения;

– множество $\mu_н(u_{гр}, \text{exp})$ – нестрого монотонных функций: постоянная функция до времени переключения и убывающая (возрастающая) экспонента после времени переключения [16, 20]. Доказательство леммы 4.1 приведено в приложении А.

Следствие леммы 4.1. Если решение задачи энергосберегающего управления с массивом реквизитов $r = (a_h, b_h, t_{0h}, t_{kh}, z_{0h}, z_{kh}, u_{нh}, u_{вh})$ существует, то функция энергосберегающая функция может иметь один из следующих видов [16, 20]:

в множестве $\mu(u_{гр})$

$$u_1^*(t) = u_{гр}, \quad t \in [t_o, t_k]; \quad u_2^*(t) = -u_{гр}, \quad t \in [t_o, t_k];$$

в множестве $\mu_c(\text{exp})$

$$\begin{aligned} u_3^*(t) &= u_0 + d_3 e^{-a(t-t_0)}; \quad u_0 < u_3^*(t_0) < u_3^*(t_k); \\ u_4^*(t) &= u_0 + d_4 e^{-a(t-t_0)}; \quad u_4^*(t_k) < u_4^*(t_0) < u_0; \\ u_5^*(t) &= u_0 + d_5 e^{-a(t-t_0)}; \quad u_0 < u_5^*(t_k) < u_5^*(t_0); \\ u_6^*(t) &= u_0 + d_6 e^{-a(t-t_0)}; \quad u_6^*(t_0) < u_6^*(t_k) < u_0; \end{aligned} \tag{4.3}$$

в множестве $\mu_н(\text{exp}, u_{‹р})$

$$u_7^*(t) = \begin{cases} d_7 e^{-a(t-t_o)} + u_o, & t \in [t_o, t_7), \\ u_в, & t \in [t_7, t_k]; \end{cases} \qquad u_8^* = (t) = \begin{cases} d_8 e^{-a(t-t_o)} + u_o, & t \in [t_o, t_8), \\ u_н, & t \in [t_8, t_k]; \end{cases}$$

в множестве $\mu_н(u_{гр}, \text{exp})$

$$u_9^*(t) = \begin{cases} u_в, & t \in [t_o, t_9), \\ d_9 e^{-a(t-t_9)} + u_o, & t \in [t_9, t_k]; \end{cases} \qquad u_{10}^*(t) = \begin{cases} u_н, & t \in [t_o, t_{10}), \\ d_{10} e^{-a(t-t_{10})} + u_0, & t \in [t_{10}, t_k]; \end{cases}$$

здесь $u_0 = \dfrac{u_в + u_н}{2}$.

Лемма 4.2. Если в качестве минимизируемого функционала взят «расход топлива» (1.2), с учетом состояния функционирования h имеющий вид

$$J_{тh} = \int_{t_{0h}}^{t_{kh}} | u_h(t) | dt \tag{4.4}$$

и для состояния $h \in H$ решение задачи (4.4), существует, то существует и ресурсосберегающее управление, при этом оно может принадлежать к следующим множествам функций:

а) константы $u_h^*(t)$=const;

б) кусочно-непрерывные постоянные функции с одним моментом времени переключения.

Доказательство аналогично лемме 4.1 для гамильтониана вида:

$$H(z,u,\psi) = -|u| + \psi(az(t) + bu(t)).$$

С целью упрощения определения вида и параметров функции ресурсосберегающего управления вводится нормированная задача ресурсосберегающего 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 $-1 \le |U_h(T)| \le 1$.

Лемма 4.3. Если для инерционного объекта первого порядка и исходной задачи (2.8)–(2.11), с функционалом $J_э$ введена нормированная задача

$$\dot{Z} = AZ_h(T) + BU_h(T) + B_0,$$

$$T \in [0;2],\ U_h(T) \in [-1;1],$$

$$J_э = \int_0^2 U_h{}^2(T)dT \to \min_U, \qquad (4.5)$$

где

$$A = a_h \frac{\Delta t}{2},\ B = b_h\, \Delta t \Delta u/4,\ B_0 = B(u_{вh} + u_{нh})/\Delta u,\ \ \Delta t = t_{kh} - t_{0h},\ \Delta u = u_{вh} - u_{нh},$$

и в качестве синтезирующих переменных используются

$$L = (z_{kh} - z_{0h}e^{2A})/B - B_0(e^{2A} - 1)/AB \vee L = \int_0^2 e^{A(2-T)}U_h(T)dT \wedge A \quad (4.6)$$

то:

1) решение задачи энергосберегающего управления существует, если

$$L_{\min}(A) \le L \le L_{\max}(A), \quad (4.7)$$

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

2) значения синтезирующих переменных A и L однозначно определяют вид функций энергосберегающего управления $U^*(T/h)$ и их параметры;

3) между функциями энергосберегающего управления исходной задачи $u_{hi}^*(t)$, $i = \overline{1,\ 10}$, функциями нормированной задачи $U_{hi}^*(t)$ имеется однозначное соответствие, т.е. задачи (2.8)–(2.11) и (4.5) являются эквивалентными.

Доказательство леммы 4.3 приведено в приложении А.

Значение синтезирующей переменной L также определяется формулой:

$$L = \int_0^2 e^{A(2-T)}U_h(T)dT. \quad (4.8)$$

Введение нормированной задачи для объекта первого порядка перекликается с идеей синтеза обобщенного настраиваемого объекта в без поисковых системах прямого адаптивного управления [251].

Определение. Множество значений (L, A) (4.8) в плоскости синтезирующих переменных, для которых имеется место функция энергосберегающего управления $U_i^*(T)$, образуют область существования энергосберегающего управления i-го вида, обозначим ее k_i.

Следствие леммы 4.1 и 4.3. Если выполняются условия лемм 4.1 и 4.2, то k_i и их границы l_i задаются следующими соотношениями [16, 20,49]:

область k_1 и k_2 есть линии l_1 и l_2, причем $l_1 = L_{max}$ при $A \in (-\infty; +\infty)$, а $l_2 = L_{min}$ при $A \in (-\infty; +\infty)$;

область $k_3,...,k_{10}$ есть участки плоскости (L, A), причем k_3 ограничена линией $l_3 = (e^{4A} - 1)/2A$, отрезком оси $L \in [0; 2]$ и полуосью $A \in (-\infty; 0)$; k_4 – линией $l_4 = -(e^{4A} - 1)/2A$, и отрезком оси $L \in [-2; 0]$, и полуосью $A \in (-\infty; 0)$; k_5 – линией $l_5 = (e^{2A} - e^{-2A})/2A$, отрезком оси $L \in [0;2]$ и полуосью $A \in (0;+\infty)$; k_6– линией $l_6 = -(e^{2A} - e^{-2A})/2A$, отрезком оси $L \in [-2; 0]$ и полуосью $A \in (0; +\infty)$; k_7– линиями l_1 и l_3 при $A \in (-\infty; 0)$; k_8– l_2 и l_4 при $A \in (-\infty; 0)$; k_9– линиями l_1 и l_5 при $A \in (0; +\infty)$; k_{10}– линиями l_2 и l_6 при $A \in (0; +\infty)$. Причем линии l_3, l_4, l_5, l_6 принадлежат соответственно областям k_3, k_4, k_5, k_6. Области существования, границы областей и виды функций ОУ изображены на рис. 4.1.

При оптимальном управлении реальным объектом приходится в задаче энерго- и ресурсосберегающего управления вместо модели (4.1) рассматривать модель с разрывной правой частью.

Будем говорить, что множество точек (L, A) в плоскости синтезирующих переменных П, для которых имеется место функция управления $u_i^*(t)$, образуют область существования i-го вида функции управления обозначим ее k_i.

Следствие 1 леммы 4.3. Если решение нормированной задачи энергосберегающего управления с массивом реквизитов r существует и выполняются условия леммы 4.3, то функции $U^*(T/h)$ в случае минимизируемого функционала $J_э$ имеют следующий вид:

$$U_1^*(T) = 1,\ T \in [0;\ 2];\ U_2^*(T) = -1,\ T \in [0;\ 2];$$

$$U_3^*(t) = D_3 e^{-AT},\ T \in [0;\ 2];\ U_4^*(T) = D_4 e^{-AT},\ T \in [0;\ 2];$$

$$U_5^*(T) = D_5 e^{-AT},\ T \in [0;\ 2];\ U_6^*(T) = D_6 e^{-AT},\ T \in [0;\ 2];$$

$$U_7^*(T) = \begin{cases} D_7 e^{-AT}, & T \in [0; T_7), \\ 1, & T \in [T_7; 2]; \end{cases} \quad U_8^*(T) = \begin{cases} D_8 e^{-AT}, & T \in [0; T_8), \\ -1, & T \in [T_8; 2]; \end{cases}$$

$$U_9^*(t)=\begin{cases}1, & T\in[0;T_9),\\ D_9e^{-AT}, & T\in[T_9;2];\end{cases}\quad U_{10}^*(T)=\begin{cases}-1, & T\in[0;T_{10}),\\ D_{10}e^{-AT}, & T\in[T_{10};2].\end{cases}$$

Виды функций энергосберегающего управления $U_i^*(T)$ изображены на рис. 4.1.

Следствие 2 леммы 4.3. Если решение нормированной задачи ресурсосберегающего управления с массивом реквизитов r существует и выполняются условия лемм 4.2 и 4.3, $U_h^*(T)$ в случае минимизируемого функционала $J_т$ имеют следующий вид для $|u_н|=u_в$:

$$u_1^*(t)=u_в=u_{гр},\ t\in[t_0,t_k];\ U_1^*(T)=1,\ T\in[0;2];$$

$$u_2^*(t)=u_н=-u_{гр},\ t\in[t_0;\ t_k];\ U_2^*(T)=-1,\ T\in[0;\ 2];$$

$$u_3^*(t)=0,\ t\in[t_0;\ t_k];\ U_3^*(T)=0,\ T\in[0;\ 2];$$

$$u_4^*(t)=\begin{cases}0, & t\in[t_0;\ t_4),\\ u_{гр}, & t\in[t_4;\ t_k],\end{cases}\quad U_4^*(T)=\begin{cases}0, & T\in[0;\ T_4),\\ 1, & T\in[T_4;\ 2],\end{cases}$$

$$u_5^*(t)=\begin{cases}0, & t\in[t_0;\ t_5),\\ -u_{гр}, & t\in[t_5;\ t_k],\end{cases}\quad U_5^*(T)=\begin{cases}0, & T\in[0;\ T_5),\\ -1, & T\in[T_5;\ 2];\end{cases}$$

$$u_6^*(t)=\begin{cases}u_{гр}, & t\in[t_0;\ t_6),\\ 0, & t\in[t_6;\ t_k],\end{cases}\quad U_6^*(T)=\begin{cases}1, & T\in[0;\ 2),\\ 0, & T\in[T_6;\ T_k];\end{cases}$$

$$u_7^*(t)=\begin{cases}-u_{гр}, & t\in[t_0;t_7),\\ 0, & t\in[t_7;t_k],\end{cases}\quad U_7^*(T)=\begin{cases}-1, & T\in[0;T_7),\\ 0, & T\in[T_7;T_k];\end{cases}$$

$$u_8(t)=u_8\in(0;1),\ t\in[t_0;t_k],\quad U_8(T)=\gamma_8\in(0;u_{гр}),\ T\in[0;2];$$

$$u_9(t)=u_9\in(-u_{гр},\ 0),\ t\in[t_0;t_k];\ U_9(T)=\gamma_9\in(-1;0),\ T\in[0;2].$$

Области существования k_i, границы областей и виды функций $U_i^*(T)$ изображены на рис. 4.2.

Следствие 3 леммы 4.3. Границы областей K_i, $i=\overline{1,\ 9}$ существования видов функций $U_h^*(T)$ и $u_h^*(t)$ для функционала $J_т$ (1.2) или (4.4) задаются следующими соотношениями:

$K_1 = L_1 = L_{\max}(A),\ A\in(-\infty;0)\cup(0,\infty),\ (A\neq 0);$
$K_2 = L_2 = L_{\min}(A),\quad A\in(-\infty;0)\cup(0;+\infty);$
$K_3: L=0,\ A\in(-\infty;+\infty);$
$K_4: L\in(0;(e^{2A}-1)/A),\ A\in(-\infty;0);$
$K_5: L\in(L_2;0),\ A\in(-\infty;0);$
$K_6: L\in(0;L_1),\ A\in(0,+\infty);$
$K_7:\quad L\in(L_2;0),\quad A\in(0,+\infty);$
$K_8:\quad L\in(0;2),\quad A=0;$
$K_9:\quad L\in(-2;0),\quad A=0.$

На рис. 4.2 в пространстве синтезирующих переменных представлены области K_i, $i=\overline{1,\ 9}$, существования видов функций для задачи (4.5).

Следствие 4 леммы 4.3. Параметры функций $u_h^*(t)$ и $U_h^*(T)$ однозначно определяются значениями для функционала вида $J_э$ (1.1) «затраты энергии»

$$D_i = \frac{L}{L_5},\ i=3;4;5;6;$$

$$d_i = \frac{\Delta u D_i}{2},\ i=3;4;5;6;$$

$$D_7 = (AL+1)e^{-2A}(\pm)\sqrt{(AL+1)^2e^{-4A}-1}\in(0;\ 1) \qquad (4.9)$$

$$T_7 = \frac{\ln D_7}{A};$$

$$D_8 = (AL-1)e^{-2A}(\pm)\sqrt{(AL-1)^2e^{-4A}-1}\in(-1;\ 0),$$

$$T_8 = \frac{\ln(-D_8)}{A};$$

$$D_9 = \left[-(AL-e^{2A})(\pm)\sqrt{(AL-e^{2A})^2-1}\right]e^{2A}>1,$$

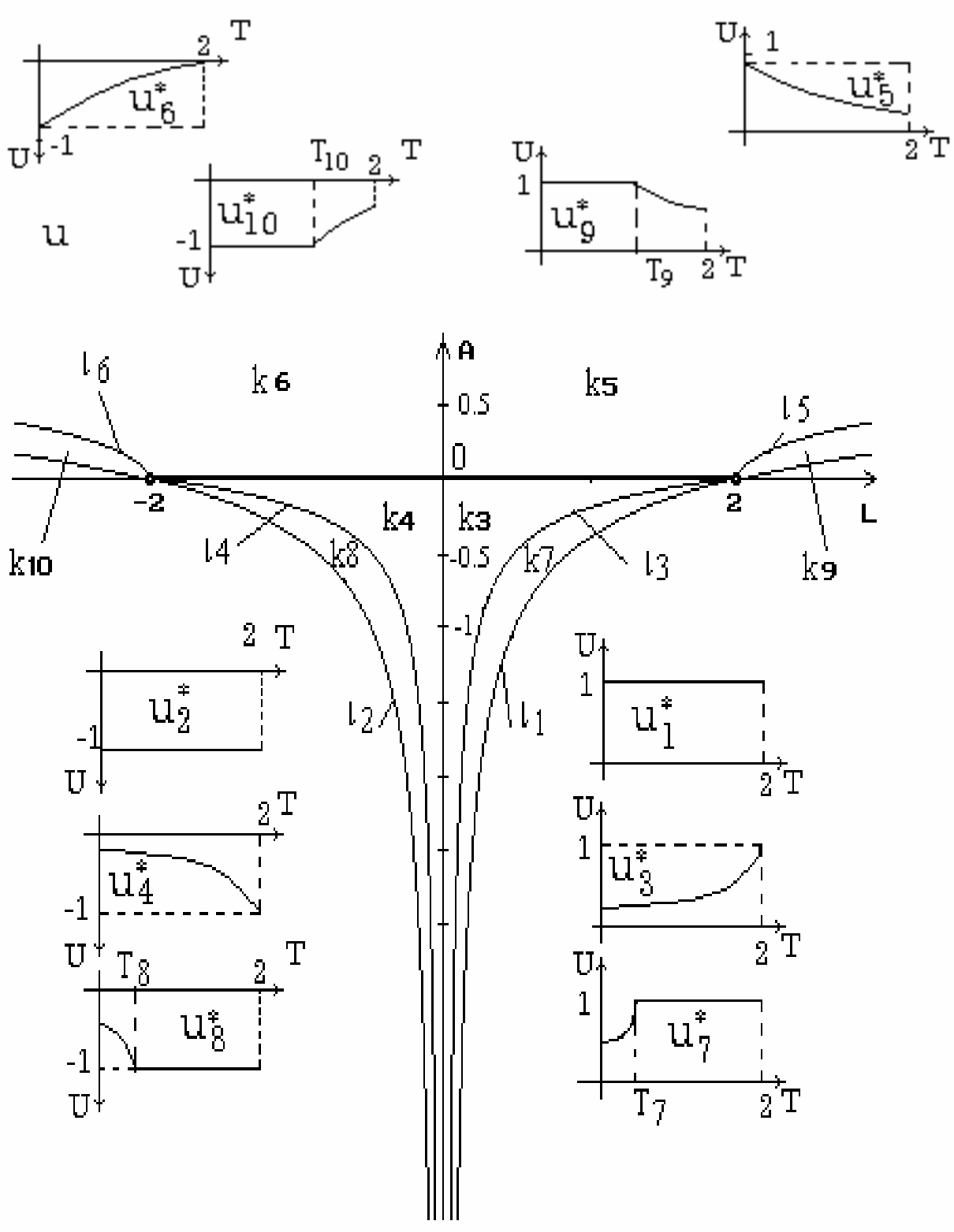


Рисунок 4.1 Области существования управления и виды функций управления $U_i^*(T)$

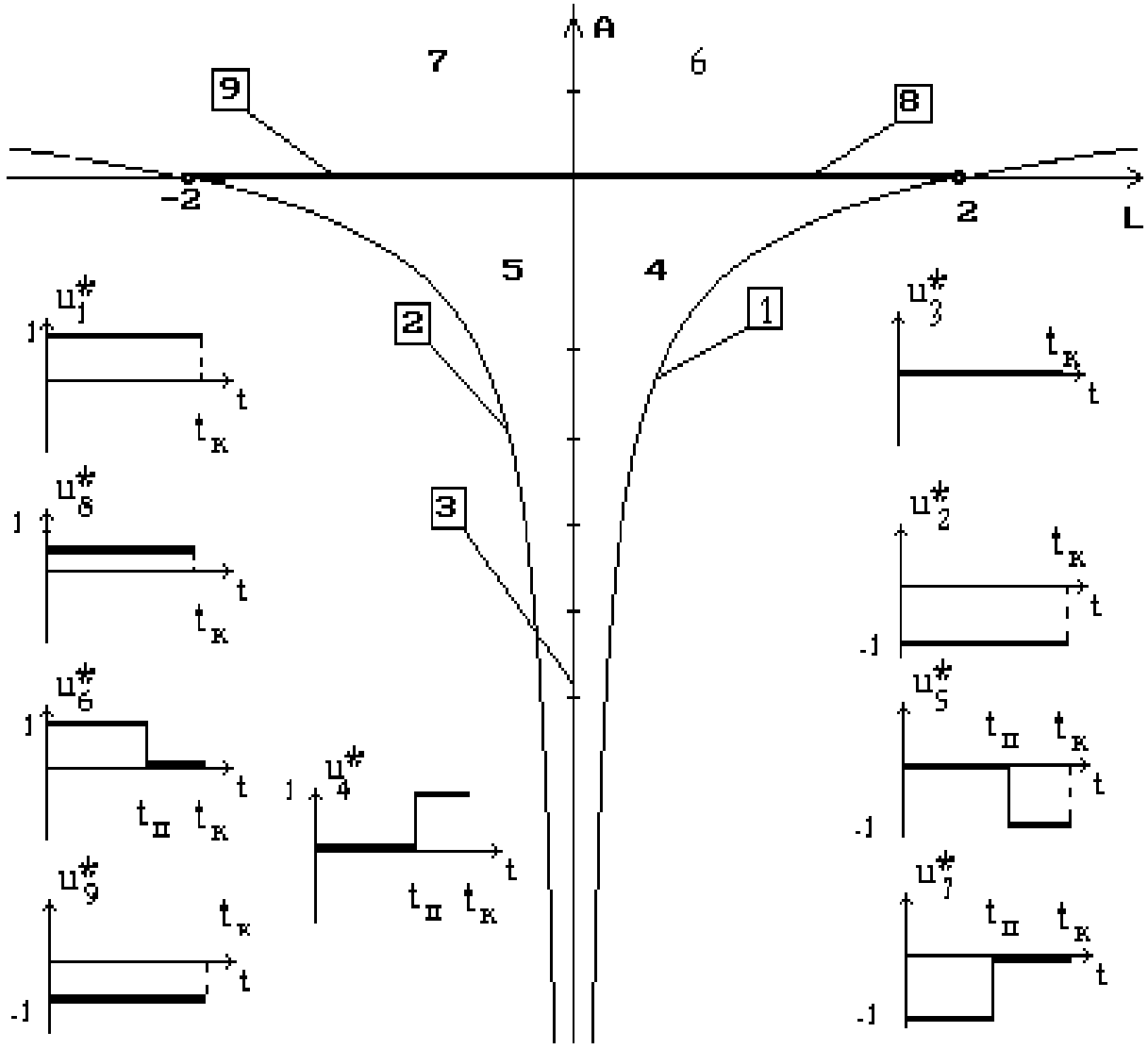


Рисунок 4.2 Области существования управления и виды функций управления $U_i^*(T)$.

$$T_9 = \frac{\ln(D_9)}{A}; d_i = \frac{\Delta u D_i}{2}, t_i = t_0 + \frac{\Delta t T_i}{2},$$

$$D_{10} = \left[-(AL + e^{2A})(\pm)\sqrt{(AL + e^{2A})^2 - 1} \right] e^{2A} < 1,$$

$$T_{10} = \frac{\ln(-D_{10})}{A}; d_i = \frac{\Delta u D}{2}, t_i = t_0 + \frac{\Delta t T_i}{2}, \quad i = 7;8;9;10;$$

для функционала вида $J_т$ (1.2) «расход топлива»

$$T_4 = -\ln\frac{((L\,A+1)e^{-2A})}{A} = 2 - \ln\frac{(L\,A+1)}{A},$$

$$T_5 = 2 - \frac{\ln(1 - L\,A)}{A},$$

$$T_6 = -\tfrac{1}{A}\ln\left(1 - ALe^{-2A}\right),$$

$$T_7 = -\frac{\ln(1 + ALe^{-2A})}{A}; \qquad (4.10)$$

$$t_i = t_0 + \frac{T_i \Delta t}{2}, \quad i = 4,5,6,7;$$

$$\gamma_i = \frac{L}{2}, \quad u_i = u_0 + \frac{L\Delta u}{4}, \quad i = 8, 9.$$

Лемма 4.4. Пусть решается задача энергосберегающего управления объектом первого порядка при функционале $J_э$, тогда для реальной и базовой задачи изменения траекторий фазовых координат полученного ОУ рассчитываются по следующим формулам:

если $u^*_1 = u_в$, $u^*_2 = u_н$; $t \in [t_0;\ t_k]$; $i = 1,\ 2;$

$$z_i^*(t) = (z_0 + bu_i/a)e^{a(t-t_0)} - bu_i/a, \qquad (4.11)$$

если u_i^*, $i = 3, 4, 5, 6$, $t \in [t_0;\ t_k]$;

$$z_i^*(t) = z_0 e^{a(t-t_0)} + \frac{b}{a}\left[u_0(e^{a(t-t_0)} - 1) + d_i\left(\frac{e^{a(t-t_0)} - e^{-a(t-t_0)}}{2}\right)\right],$$

если $u_7 = u_в; u_8 = u_н; i = 7,\ 8;$

$$z_i^*(t) = \begin{cases} (z_0 + \dfrac{bu_0}{a} + \dfrac{bd_i}{2a})e^{a(t-t_0)} - \dfrac{bu_0}{a} - \dfrac{bd_i e^{-a(t-t_0)}}{2a}, & t \in [t_0;\ t_i), \\ (z(t_i) + \dfrac{bu_i}{a})e^{a(t-t_i)} - \dfrac{bu_i}{a}, & t \in [t_i;\ t_k]; \end{cases}$$

$u_9 = u_в; u_{10} = u_н; i = 9, 10;$

$$z_i^*(t) = \begin{cases} (z_0 + \dfrac{bu_i}{a})e^{a(t-t_0)} - \dfrac{bu_i}{a}, & t \in [t_0, t_i), \\ \left(z(t_i) + \dfrac{bu_0}{a} + \dfrac{bd_i}{2a}\right)e^{a(t-t_i)} - \dfrac{bu_0}{a} - \dfrac{bd_i}{2a}e^{-a(t-t_i)}, & t \in [t_i; t_k] \end{cases}$$

Нормированный вид

$$Z_1^*(T)=\left(z_0+\frac{B_0}{A}\right)e^{AT}-\frac{B}{A}\left(1-e^{AT}\right)-\frac{B_0}{A},\ T\in[0;\ 2],$$

$$Z_2^*(T)=\left(z_0+\frac{B_0}{A}\right)e^{AT}+\frac{B}{A}\left(1-e^{AT}\right)-\frac{B_0}{A},\ T\in[0;\ 2]; \qquad (4.12)$$

$$Z_i^*(T)=\left(z_0+\frac{B_0}{A}+\frac{BD_i}{2A}\right)e^{AT}-\frac{B_0}{A}-\frac{BD_i}{2A}e^{-AT};\ T\in[0;\ 2]$$

$$i=3;4;5;6;$$

$$Z_7^*(T)=\begin{cases}\left(z_0+\frac{B_0}{A}+\frac{BD_7}{2A}\right)e^{AT}-\frac{B_0}{A}-\frac{BD_7}{2A}e^{-AT},T\in[0;\ T_7)\\ \left(Z(T_7)+\frac{B_0+B}{A}\right)e^{A(T-T_7)}-\frac{B_0+B}{A},T\in[T_7;\ 2];\end{cases}$$

$$Z_8^*(T)=\begin{cases}\left(z_0+\frac{B_0}{A}+\frac{BD_8}{2A}\right)e^{AT}-\frac{B_0}{A}-\frac{BD_8}{2A}e^{-AT},T\in[0;\ T_8)\\ \left(Z(T_8)+\frac{B_0-B}{A}\right)e^{A(T-T_8)}-\frac{B_0-B}{A},T\in[T_8;\ 2];\end{cases}$$

$$Z_9^*(T)=\begin{cases}\left(z_0+\frac{B_0+B}{A}\right)e^{AT}-\frac{B_0+B}{A},T\in[0,T_9),\\ \left(Z(T_9)+\frac{B_0}{A}\right)e^{A(T-T_9)}+BD_9\frac{e^{A(T-2T_9)}-e^{-AT}}{2A}-\frac{B_0}{A},T\in[T_9,\ 2];\end{cases}$$

$$Z_{10}^*(T)=\begin{cases}\left(z_0+\frac{B_0-B}{A}\right)e^{AT}-\frac{B_0-B}{A},\ T\in[0,T_{10}),\\ \left(Z(T_{10})+\frac{B_0}{A}\right)e^{A(T-T_{10})}+BD_{10}\frac{e^{A(T-2T_{10})}-e^{-AT}}{2A}-\frac{B_0}{A},T\in[T_{10},\ 2]\end{cases}$$

При доказательстве леммы 4.4 используется методы синтезирующих переменных и нормированной задачи [212].

Следствие 2 леммы 4.1. Расчет функционалов $J_э$ производится по следующим формулам:

$$J_э(u_i^*)=(u_i)^2\Delta t,\ i=1;\ 2; \qquad u_1=u_в,\ u_2=u_н,$$

$$J_э(u_i^*)=\frac{d_i^2(1-e^{-2a\Delta t})}{2a}+2d_iu_0\frac{1-e^{-a\Delta t}}{a}+u_0^2\Delta t, \qquad (4.13)$$

$$J_э(u_i^*)=\frac{d_i^2(1-e^{-2a(t_i-t_0)})}{2a}+2d_iu_0\frac{1-e^{-e(t_i-t_0)}}{a}+u_0^2(t_i-t_0)+u_i^2(t_k-t_i),$$

$i=7;8;\ u_7=u_в,\ u_8=u_н;$

$$J_э(u_i^*)=u_i^2(t_i-t_0)+\frac{d_i^2(1-e^{-2a(t_k-t_i)})}{2a}+2d_iu_0\frac{1-e^{-a(t_k-t_i)}}{a}+u_0^2(t_k-t_i),$$

$i=9;\ 10;\ u_9=u_в,\ u_{10}=u_н.$

Лемма 4.5. Пусть решается энергосберегающего управления (2.8)–(2.11) при функционале $J_э$ (1.1), тогда для реальной и базовой задач изменения траекторий фазовых координат при полученном управляющем воздействии рассчитываются по следующим формулам:

$$z_1^*(t)=\left(z_0+\frac{bu_{гр}}{a}\right)e^{a(t-t_0)}-\frac{bu_{гр}}{a},\ t\in[t_0;\ t_k];$$

$$z_2^*(t)=\left(z_0-\frac{bu_{гр}}{a}\right)e^{a(t-t_0)}+\frac{bu_{гр}}{a},\ t\in[t_0,\ t_k];$$

$$z_3^*(t)=z_0e^{a(t-t_0)},\ t\in[t_0,\ t_k];$$

$$z_4^*(t)=\begin{cases}z_0e^{a(t-t_0)},\ t\in[t_o,\ t_k),\\ z(t_4)e^{a(t-t_4)}-\dfrac{bu_{гр}}{a}\left(1-e^{a(t-t_4)}\right),\ t\in[t_4,\ t_k];\end{cases}$$

$$z_5^*(t)=\begin{cases}z_0e^{a(t-t_0)},\ t\in[t_0,\ t_5),\\ z(t_5)e^{a(t-t_5)}+\dfrac{bu_{гр}}{a}\left(1-e^{a(t-t_5)}\right),\ t\in[t_5,\ t_k];\end{cases}$$

$$z_6^*(t)=\begin{cases}\left(z_0+\dfrac{bu_{\text{‹}p}}{a}\right)e^{a(t-t_0)}-\dfrac{bu_{\text{›}p}}{a}, t\in[t_0,\ t_6);\\ z(t_6)e^{a(t-t_6)} \quad t\in[t_6,\ t_k]\end{cases}$$

$$z_7^*(t)=\begin{cases}\left(z_0-\dfrac{bu_{\text{‹}p}}{a}\right)e^{a(t-t_0)}+\dfrac{bu_{\text{›}p}}{a},\ t\in[t_0;\ t_7];\\ z(t_7)e^{a(t-t_7)},\ t\in[t_7;\ t_{\text{ђ}}];\end{cases}$$

$$z_i^*(t)=z_0e^{a(t-t_0)}-\frac{bu_i(1-e^{a(t-t_0)})}{a},\ t\in[t_0;\ t_K];\ i=8,9.$$

Нормированный вид.

$$Z_1^*(T)=\left(z_0+\frac{B_0}{A}\right)e^{AT}-\frac{B(1-e^{AT})}{A}-\frac{B_0}{A},\ T\in[0;\ 2];$$

$$Z_2^*(T)=\left(z_0+\frac{B_0}{A}\right)e^{AT}+\frac{B}{A}\left(1-e^{AT}\right)-\frac{B_0}{A},\ T\in[0;\ 2];$$

$$Z_3^*(T)=\left(z_0+\frac{B_0}{A}\right)e^{AT}-\frac{B_0}{A},\ T\in[0;\ 2];$$

$$Z_4^*(T)=\begin{cases}\left(z_0+\dfrac{B_0}{A}\right)e^{AT}-\dfrac{B_0}{A},\ T\in[0;\ T_4);\\ Z(T_4)e^{A(T-T_4)}-\dfrac{-(B+B_o)}{A}\left(1-e^{A(T-T_4)}\right),\ T\in[T_4;\ 2];\end{cases}$$

$$Z_5^*(T)=\begin{cases}\left(z_0+\dfrac{B_0}{A}\right)e^{AT}-\dfrac{B_0}{A},\ T\in[0;\ T_5);\\ Z(T_5)e^{A(T-T_5)}-\dfrac{(B_0-B)}{A}\left(1-e^{A(T-T_5)}\right),\ T\in[T_5;\ 2];\end{cases}$$

$$Z_6^*(T)=\begin{cases}z_0e^{AT}-\dfrac{(B_0-B)}{A}\left(1-e^{AT}\right),\ T\in[0,\ T_6);\\ Z(T_6)e^{A(T-T_6)}-\dfrac{B_0}{A}\left(1-e^{A(T-T_6)}\right),\ T\in[T_6,\ 2];\end{cases}$$

$$Z_7^*(T)=\begin{cases}z_0e^{AT}-\dfrac{(B_0-B)(1-e^{AT})}{A},\ T\in[0;\ T_7);\\ Z(T_7)e^{A(T-T_7)}-\dfrac{B_0(1-e^{A(T-T_7)})}{A},\ T\in[T_7;\ 2];\end{cases}$$

$$Z_i^*(T)=z_0 e^{AT}-\frac{B_0+0{,}5LB}{A}\left(1-e^{AT}\right),\ T\in[0;\ 2];\ i=8{,}9.$$

Следствие леммы 4.2. Если выполняются условия лемм 4.3 и 4.4, то функционал $J_{\text{т}}$ рассчитывается по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
&J_{\text{т}}(u_i^*)=\left|u_{гр}\right|(t_{\text{k}}-t_0),\ i=1{,}2;\quad I(u_3^*)=0;\\
&J_{\text{т}}(u_4^*)=u_{гр}(t_k-t_4),\ J_{\text{т}}=(u_5^*)=\left|u_{гр}\right|(t_k-t_5);\\
&J_{\text{т}}(u_6^*)=u_{гр}(t_6-t_0),\ J_{\text{т}}(u_7^*)=\left|u_{\text{гр}}\right|(t_7-t_0),\\
&J_{\text{т}}(u_i)=\left|u_i\right|(t_k-t_0),\ i=8{,}9.
\end{aligned}\qquad (4.14)$$

Введение нормированной задачи и синтезирующих переменных позволило получить простые формулы для расчета параметров функций ресурсосберегающего управления непосредственно по массиву исходных данных. Таким образом, приведены соотношения полного анализа управления для задач энерго- или ресурсосбережения.

Приведенные выше соотношения для расчета: границ областей существования решения задач энерго- и ресурсосберегающего управления, функций энерго- и ресурсосберегающего управления, параметров функций энерго- и ресурсосберегающего управления содержатся во фреймах БЗ ИИУС ТТА.

4.2 Расширенный анализ оптимального управления при наличии дестабилизирующих факторов в режиме «Пуск» на множестве состояний функционирования

Математическая формулировка задачи оптимального управления некоторым объектом, с действием ДФ по каналу управления, являющихся

случайным процессом типа шум [42], имеет следующий вид. Модель динамики объекта для программной стратегии управления может быть представлена в виде:

$$\dot{z} = \mathbf{A}z(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{C}w(t). \qquad (4.15)$$

Данный объект за фиксированный интервал времени $[t_0, t_к]$ требуется перевести из начального состояния в конечную область:

$$z(t_0) = z^0,\ z(t_к) \in \chi^к, \qquad (4.16)$$

при имеющихся ограничениях на управление и дестабилизирующие факторы (шум)

$$\forall\, t \in [t_0, t_к],\ u(t) \in [u_н, u_в],\quad w(t) \in [w_н, w_в]. \qquad (4.17)$$

При этом минимизируется функционал (затраты энергии)

$$J_э = \int_{t_0}^{t_к} u^2(t)dt \to \min, \qquad (4.18)$$

где $z(t)$ – фазовые координаты; $u(t)$– управляющее воздействие; $w(t)$– дестабилизирующие факторы; $\mathbf{A, B, C}$ – матрицы параметров модели; границы, в которых изменяются: управляющее воздействие – $u_н, u_в$ и шум – $w_н, w_в$; z^0– начальное значение фазовой координаты; $\chi^к(\cdot)$ – конечная область, в которую требуется перевести объект. Массив реквизитов (массив исходных данных) для решения задачи управления имеет следующий вид:

$$\Re = (\mathbf{A, B, C,}\ u_н,\ u_в,\ z^0,\ \chi^к(\cdot),\ t_0,\ t_к,\ w_н,\ w_в). \qquad (4.19)$$

Расширенный анализ задачи оптимального управления основан на использовании широко известного принципа максимума Понтрягина и метода синтезирующих переменных [42].

Определение 4.1. Будем называть *расширенным* анализ оптимального управления исследуемым объектом с учетом действующих на него по каналу управления различных дестабилизирующих факторов.

Выделим следующие этапы расширенного анализа оптимального управления [42].

1. Введение нормированной задачи ОУ с учетом дестабилизирующих факторов, действующих на объект.

2. Введение синтезирующих переменных, учитывающих действие дестабилизирующих факторов.

3. Определение условий существования решения ЗОУ.

4. Получение формул и условий, задающих границы всех областей существования для конкретных видов функций управляющих воздействий.

Рассмотрим предложенный алгоритм расширенного анализа для инерционного объекта первого порядка.

Важным этапом оперативного решения ЗОУ является установление связи функции оптимального управления с массивом реквизитом поставленной задачи. Для этого необходимо сформулировать так называемую нормированную задачу.

Определение 4.2. *Нормированной* называется задача, для которой интервал времени нормируется в пределах [0, 2], а области допустимых управляющих воздействий и действия дестабилизирующих факторов представляют собой отрезки [–1, 1].

Перейдем от реальной задачи оптимального управления к нормированной следующим образом. Преобразуем:

– интервал времени

$$t \in [t_0, t_к] \to T \in [0, 2],$$

– интервал управления

$$u(t) \in [u_н, u_в] \to U(T) \in [-1, 1],$$

– действующее возмущение

$$\mathrm{w(t)} \in [w_н, w_в] \to W(T) \in [-1, 1].$$

В результате чего задача (4.15)–(4.18) будет приведена к следующему виду – для инерционного объекта первого порядка:

$$\dot{z} = az(t) + bu(t) + cw(t) \to \dot{Z} = AZ(T) + BU(T) + CW(T). \qquad (4.20)$$

Здесь

$$A = a\frac{\Delta t}{2},\ B = b\frac{\Delta u}{2}\frac{\Delta t}{2},\ C = c\frac{\Delta w}{2}\frac{\Delta t}{2},$$

$$\Delta t = t_к - t_0,\ \Delta u = u_в - u_н,\ \Delta w = w_в - w_н.$$

Утверждение 4.1. Переход от реальной задачи оптимального управления к нормированной осуществляет по формулам:

для времени:

$$T = 2\frac{t - t_0}{t_к - t_0},$$

для управления:

$$U = \frac{u - u_0}{u_в - u_0},\ u_0 = \frac{u_н + u_в}{2},$$

для возмущающего воздействия:

$$W = \frac{w - w_0}{w_в - w_0},\ w_0 = \frac{w_н + w_в}{2}.$$

Обратные преобразования – от нормированной задачи к исходной имеют вид:

для времени:

$$t = \frac{t_к - t_0}{2}T + t_0,$$

для управления:

$$u = U(u_в - u_0) + u_0,$$

для возмущающего воздействия:

$$w = W(w_в - w_0) + w_0.$$

Решение задачи Коши уравнения (4.20) дает возможность определить синтезирующие переменные. Это решение имеет вид:

$$Z(t_к) = e^{2A} Z(t_0) + \int_0^2 e^{A(2-S)} [BU(S) + CW(S)] dS . \qquad (4.21)$$

Утверждение 4.2. Синтезирующие переменные

$$A = a\frac{\Delta t}{2} \quad \text{и} \quad L = \frac{Z(t_к) - Z(t_0)e^{2A}}{B} = \int_0^2 e^{A(2-S)} U(S) dS + \frac{C}{B}\int_0^2 e^{A(2-S)} W(S) dS \qquad (4.22)$$

задачи (4.15)–(4.18) вычисляются по массиву реквизитов (4.19) и однозначно задают положение точки (A, L) на синтезирующей плоскости.

Нахождение границ области существования решения ЗОУ при $A < 0$ выполняется подстановкой нормированных граничных значений управления и возмущающего воздействия в (4.22).

Утверждение 4.3. Наличие дестабилизирующих факторов по каналу управления приводит к тому, что внешние границы области существования решения ЗОУ превращаются в «коридоры» некоторой ширины, зависящей от интенсивности помехи:

$$u(t) = u_н,\ w(t) = w_н: \qquad L^{(-)}_{\min}(A) = -\frac{e^{2A} - 1}{A}\left(1 + \frac{C}{B}\right),$$

$$u(t) = u_н,\ w(t) = w_в: \qquad L^{(-)}_{\max}(A) = -\frac{e^{2A} - 1}{A}\left(1 - \frac{C}{B}\right),$$

$$u(t) = u_в,\ w(t) = w_н: \qquad L^{(+)}_{\min}(A) = \frac{e^{2A} - 1}{A}\left(1 - \frac{C}{B}\right),$$

$$u(t) = u_в,\ w(t) = w_в: \qquad L^{(+)}_{\max}(A) = \frac{e^{2A} - 1}{A}\left(1 + \frac{C}{B}\right).$$

Область существования решения ЗОУ с наличием дестабилизирующих факторов по каналу управления представлена на рис. 4.3.

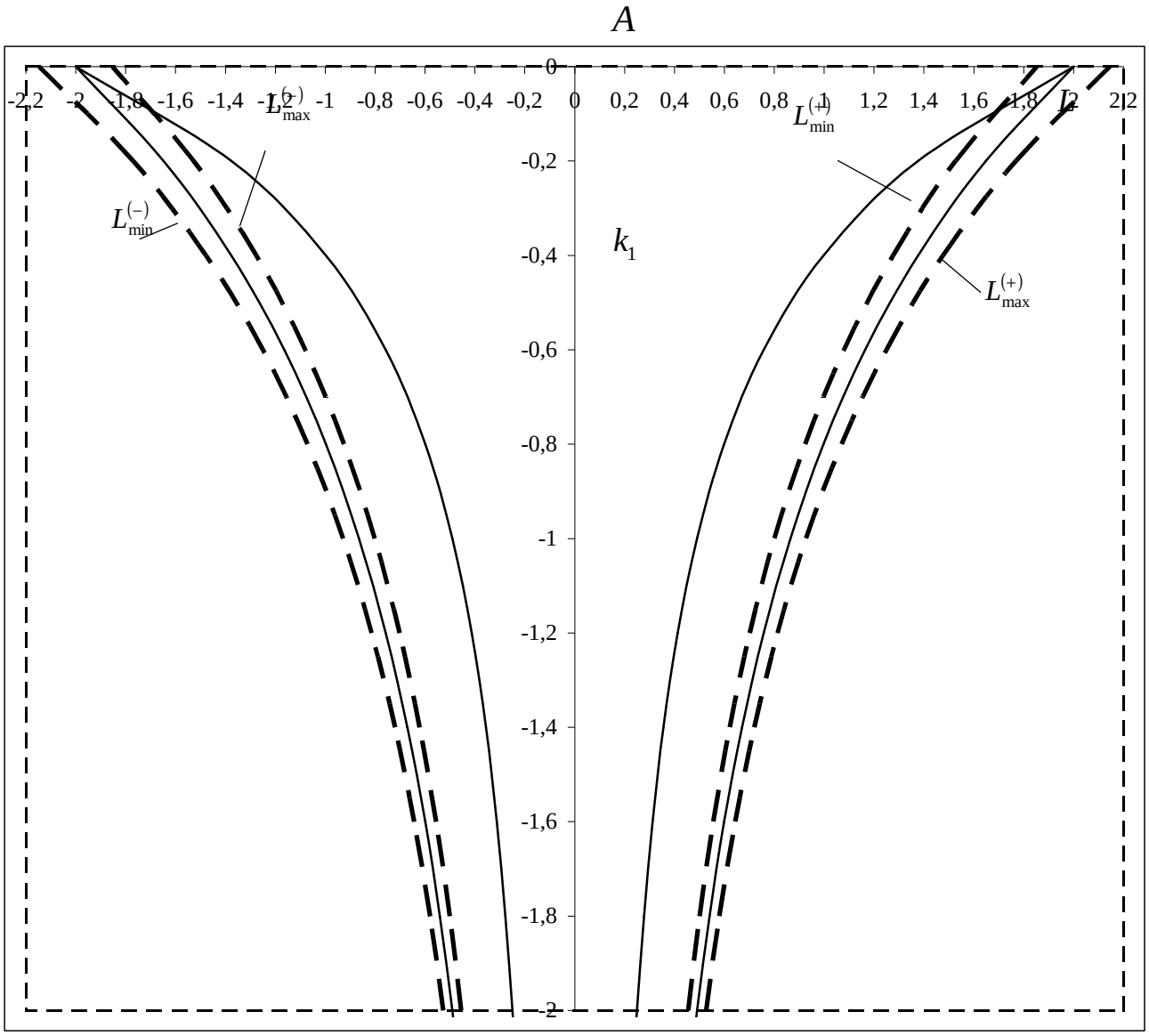


Рисунок 4.3 Область существования решения задачи управления

Утверждение 4.4. Существование решения задачи управления при наличии дестабилизирующих факторов определяется местом нахождения точки (A, L) в области существования решения ЗОУ. Именно,

1. Если $L \notin [L_{\min}^{(-)}, L_{\max}^{(+)}]$, то решение задачи управления не существует;

2. Если $L \in [L_{\min}^{(-)}, L_{\max}^{(-)}]$ или $L \in [L_{\min}^{(+)}, L_{\max}^{(+)}]$, то возможность существования решения задачи управления определяется характером влияния помех в канале управления;

3. Если $L \in [L_{\max}^{(-)},\ L_{\min}^{(+)}]$, то решение задачи управления существует.

Соотношение сигнала к шуму в ИИУС ТТА определяет выбор стратегии управления. Когда интенсивность шума мала, и им можно пренебречь, используют программную стратегию управления. Иначе, применяют позиционную стратегию.

При использовании позиционной стратегии управления на каждом шаге пересчитываются значения вектора синтезирующих переменных по изменяющимся данным массива реквизитов. Синтезирующие переменные однозначно определяют область существования вида функции управляющего воздействия и саму функцию.

При работе ИИУС ТТА в условия наличия помех по каналам управления и измерения синтезирующая функция может менять свой вид, а вектор синтезирующих переменных может выходить за границы зон управления и даже за границы области существования решения задачи управления. Поэтому наличие ДФ следует учитывать уже на стадии анализа ЗОУ.

Рассмотрим следующую постановку задачи ОУ. Пусть модель динамики объекта в дискретной форме с учетом наличия ДФ в каналах управления и измерения при позиционной стратегии задается в виде уравнений состояния и наблюдения

$$z_i = Fz_{i-1} + G(u_{i-1} + w_{i-1}),\ i = \overline{1, N}, \quad F = \mathrm{e}^{a\delta t}, G = -\frac{b}{a}(1 - \mathrm{e}^{a\delta t}), \tag{4.23}$$

$$y_i = z_i + v_i.$$

При этом необходимо перевести объект за фиксированное количество шагов N из начального состояния в конечную область

$$z_0 = z^0,\ z_N \in [z_{\text{н}}^{\text{к}};\ z_{\text{в}}^{\text{к}}]. \tag{4.24}$$

Пусть на каждом шаге имеются следующие ограничения на управляющее воздействие:

$$\forall\, i \in [0,\, N-1],\ u_i \in [u_{\text{н}},\, u_{\text{в}}]. \tag{4.25}$$

Требуется минимизировать функционал (затраты энергии)

$$J_{\text{э}} = \delta t \sum_{i=1}^{N} u_i^2 \to \min_{u}. \tag{4.26}$$

Здесь z_i – фазовая координата; u_i – управляющее воздействие; y_i – выходная переменная; w_i, v_i – «белые» или «цветные» шумы в каналах управления и измерения с нулевыми средними и среднеквадратическими отклонениями σ_w и σ_v соответственно; F, G, a, b – параметры модели динамики объекта; $u_{\text{н}}, u_{\text{в}}$ – нижняя и верхняя границы для управляющего воздействия; z^0 – начальное значение фазовой координаты; $[z_{\text{н}}^{\text{к}};\ z_{\text{в}}^{\text{к}}]$ – конечная область, в которую следует перевести объект; N – число шагов на интервале управления $[t_0; t_{\text{к}}]$; δt – шаг дискретизации времени.

Массив исходных данных задачи (4.15)–(4.18) имеет вид

$$R = (a, b, u_{\text{н}}, u_{\text{в}}, z^0, z_{\text{н}}^{\text{к}}, z_{\text{в}}^{\text{к}}, t_0, t_{\text{к}}, \delta t, \sigma_w, \sigma_v). \tag{4.27}$$

Заметим, что в выше сформулированной задаче энергосберегающего управления ограничения на управляющее воздействие, которые задаются формулой (4.17), симметричны: $|u_{\text{н}}| = u_{\text{в}}$. Обычно данный тип задач применяется при управлении движущимися объектами, а случай с несимметричными ограничениями на управление, как правило, рассматривается для стационарных объектов [111].

Применительно к задаче (4.15)–(4.18) вектор синтезирующих переменных имеет вид: [42]

$$\Lambda = (L_i, A_i)^{\text{т}},\ i = \overline{1, N},$$

где

$$L_i = 4\frac{z^{\text{к}} - y_i\, \text{e}^{a\tau}}{b(u_{\text{в}} - u_{\text{н}})\tau} - 2\frac{(u_{\text{в}} + u_{\text{н}})(\text{e}^{a\tau} - 1)}{a((u_{\text{в}} - u_{\text{н}})\tau)}, \qquad A_i = \frac{a\tau}{2},$$

$$\tau = t_{\text{к}} - (t_0 + i\delta t), \qquad z^{\text{к}} = z_{\text{н}}^{\text{к}} + \frac{\left| z_{\text{в}}^{\text{к}} - z_{\text{н}}^{\text{к}} \right|}{2}.$$

Область значений вектора Λ, при которых задача (4.15)–(4.18) имеет решение с функцией управления u_i, называется *областью существования* решения задачи энергосберегающего управления. В области существования решения энергосберегающего управления можно выделить три зоны $k_j, j = \overline{1,3}$, где

$$k_1: \quad \frac{\left(1 - \mathrm{e}^{2a\tau}\right)}{a\tau} \le L_i \le \frac{\left(\mathrm{e}^{2a\tau} - 1\right)}{a\tau}, \tag{4.28}$$

$$k_2: \quad \frac{\left(\mathrm{e}^{2a\tau} - 1\right)}{a\tau} \le L_i \le \frac{2\left(\mathrm{e}^{a\tau} - 1\right)}{a\tau}, \tag{4.29}$$

$$k_3: \quad \frac{2\left(1 - \mathrm{e}^{a\tau}\right)}{a\tau} \le L_i \le \frac{\left(1 - \mathrm{e}^{2a\tau}\right)}{a\tau}. \tag{4.30}$$

Функции управления для зон k_j вычисляются по следующим формулам:

$$\text{для зоны } k_1: \quad u_i^* = u_0 + \frac{a\left(u_{\text{в}} - u_{\text{н}}\right)\tau}{2\left(\mathrm{e}^{a\tau} - \mathrm{e}^{-a\tau}\right)} L_i, \quad u_0 = \frac{u_{\text{в}} + u_{\text{н}}}{2}, \tag{4.31}$$

$$\text{для зоны } k_2: \quad u_i^* = u_0 + \frac{1}{2}\left\{\left[\frac{a\tau}{2} L_i + 1\right]\mathrm{e}^{-a\tau} \pm \sqrt{\left(\frac{a\tau}{2} L_i + 1\right)^2 \mathrm{e}^{-2a\tau} - 1}\right\}, \tag{4.32}$$

$$\text{для зоны } k_3: \quad u_i^* = u_0 + \frac{\left(u_{\text{в}} - u_{\text{н}}\right)}{2}\left\{\left[\frac{a\tau}{2} L_i - 1\right]\mathrm{e}^{-a\tau} \pm \sqrt{\left(\frac{a\tau}{2} L_i - 1\right)^2 \mathrm{e}^{-2a\tau} - 1}\right\}. \tag{4.33}$$

Заметим, что при наличии ДФ, действующих по каналам управления и измерения, вектор синтезирующих переменных может переходить из одной зоны в другую, при этом синтезирующая функция меняет вид, и даже может выходить за границы области существования решения задачи энергосберегающего управления. Предложенный расширенный полный анализ позволяет учесть

влияние ДФ, при решении задач оптимального управления, методы и алгоритмы решения, которых приводится в пятой главе.

4.3 Интеллектуальный синтез управляющих воздействий в режиме «Пуск» на множестве состояний функционирования

Традиционная последовательность расчета управляющий воздействий для заданных условий (массива k) задачи (2.8)–(2.10) для объекта (4.1) с функционалами вида (1.1) или (1.2) предполагает подстановку в интегральное уравнение (4.2) одного из видов $U_{\vartheta}^{*}(t)$, расчет параметров функции управления решением системы (в общем, случае нелинейных) уравнений; если решение для одного вида не существует, то переходят к следующему виду функции управления, и т.д. Такой подход к синтезу управляющих воздействий может быть реализован лишь на основе управляющей ЭВМ и требует значительных затрат машинного времени. В работе предлагается интеллектуальный синтез оптимального управления на МСФ.

Определение 4.3. Под интеллектуальным синтезом будем понимать оперативный синтез управляющих воздействий при реальной эксплуатации ИИУС ТТА без лица принимающего решение.

Интеллектуальный синтез управляющих воздействий на МСФ по результатам полного анализа функций управляющих воздействий на МСФ решение задачи интеллектуального синтеза управления $u_h^{*}(t)$ для нового состояния h может производиться следующим образом:

1) определяются реквизиты задачи управления для момента переключения θ, т. е.

$$r_h = (a_h, b_h, \theta, t_{kh}, z_{\theta h}, z_{kh}, u_{\text{нh}}, u_{\text{вh}});$$

2) с использованием массива реквизитов r_h рассчитываются реквизиты нормированной задачи управления, например (4.5) и значения синтезирующих переменных L, A;

3) с помощью соотношений (4.7) проверяется выполнение условий существования решения задачи управления при реквизитах r_h;

4) если решение задачи управления существует, то по значениям L, A определяется вид функции управления;

5) для выделенного вида управления рассчитываются параметры $U_h^*(T)$ нормированной задачи управления (4.9), а затем параметры функции $u_h^*(t)$ реальной задачи.

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

Программная и аппаратная реализация результатов анализа и синтеза функций управляющих воздействий на МСФ с использованием метода синтезирующих переменных позволяет создавать интеллектуальные ИИУС ТТА, оперативно синтезирующие управляющие воздействия с учетом изменения состояния функционирования в режиме «Пуск».

4.4 Анализ и интеллектуальный синтез управляющих воздействий в режиме «Процесс» на множестве состояний функционирования

Анализ и интеллектуальный синтез управляющих воздействий на МСФ режима «Процесс» проводится с учетом особенностей процессов, происходящих в конкретном ТТА. Важным этапом при анализе и синтезе управляющих воздействий процессами сушки является определение множества состояний функционирования. Введенная Ю.Л.Муромцевым [185] классификация систем на МСФ, относит сушильные установки с использованием управляющего устройства к третьему или четвертому классу, в зависимости от решаемой задачи управления.

Системы третьего класса характеризуются тем, что на временном интервале управления $T \in [t_0;\ t_к]$ происходит смена состояния функционирования, но при этом значение переменной h, описывающей изменение состояния функционирования, однозначно идентифицируется, т.е. известно в текущий момент времени $t \in T$. В этих случаях предлагается использовать модель объекта в виде кусочно-постоянной траектории изменения оператора системы, в которой случайные моменты переключения оператора соответствуют сменам значений h на траектории. Такие модели описываются в виде дифференциальных уравнений с разрывной правой частью.

Системы четвертого класса отличаются тем, что на временном интервале управления $T \in [t_0;\ t_к]$ также происходит смена состояния функционирования, но текущие значения переменной h, характеризующей эти изменения, в конкретный момент времени неизвестны. При создании моделей систем четвертого класса следует на интервале T рассматривать множество $\mathcal{H}$ всех возможных траекторий течения процесса, начинающихся в состоянии $h(t_0)$. В качестве оператора системы четвертого класса применяется граф, описывающий изменения возможных состояний функционирования [185].

При проектировании ИИУС ТТА за элементы множества $\mathcal{H}$ всех возможных траекторий изменения состояний функционирования $h_l(\cdot)$ выбираем величины отклонений значений влажности материала для i-ой камеры от требуемых регламентом значений влажности $\bar{y}_i$. Вектор выходных переменных для контролируемых n-ой и $(n+1)$-ой камер сушильной установки имеет вид $y = \left(\varphi_{\text{i=n}}, \varphi_{i+1=n+1}, m(\varphi_k^{\text{к}})\right)$. Множество $\mathcal{H}$ задают в виде морфологической таблицы, элемент $h_l(\cdot) \in \mathcal{H}$ этой таблицы имеет три компоненты $h_l(\cdot) = (h_{l\,i}, h_{l\,i+1}, h_{l\,k})$, две из которых $h_{l\,i}, h_{l\,i+1}$ принимают одно из пяти возможных значений, а компонента h_{lk} – одно из трех:

$$h_{l\,i} = \begin{cases} h_{l\,i}^{\text{ННД}}, \ \textit{если} \ \ y_i < (\bar{y}_i - \delta_i^{(2)}), \\ h_{l\,i}^{\text{НД}}, \ \textit{если} \ \ y_i \in [\bar{y}_i - \delta_i^{(2)}, \ \bar{y}_i - \delta_i^{(1)}), \\ h_{l\,i}^{\text{Д}}, \ \textit{если} \ \ y_i \in [\bar{y}_i - \delta_i^{(1)}, \ \bar{y}_i + \delta_i^{(1)}], \\ h_{l\,i}^{\text{ВД}}, \ \textit{если} \ \ y_i \in (\bar{y}_i + \delta_i^{(1)}, \ \bar{y}_i + \delta_i^{(2)}], \\ h_{l\,i}^{\text{НВД}}, \ \textit{если} \ \ y_i > (\bar{y}_i + \delta_i^{(2)}) \quad i = n, n+1; \end{cases}$$

$$h_{l\,k} = \begin{cases} h_{lk}^{\text{Н}}, \ \textit{если} \ \ y_k < 0{,}65, \\ h_{lk}^{\text{СР}}, \ \textit{если} \ \ y_k \in [0{,}65; \ 0{,}8], \\ h_{lk}^{\text{В}}, \ \textit{если} \ \ y_k > 0{,}8, \end{cases} \tag{4.34}$$

здесь $\delta_i^{(1)}, \delta_i^{(2)}$ – заданные отклонения y_i от $\bar{y}_i$ $(\delta_i^{(1)} < \delta_i^{(2)})$; k – номер последней камеры; через ННД обозначена влажность материала, 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 доверия [15].

Таблица 4.1 Множество состояний функционирования $\mathcal{H}$ для фиксированного момента времени

Состояние $h_l'(\cdot) \vee h_l(\cdot)$	Состояния элементов множества $\mathcal{H}$		
	$h_{li}(t)$	$h_{li+1}(t)$	$h_{lk}(t)$
1	2	3	4
$h_1'(\cdot) \vee h_1(\cdot)$	$h_{1,n}^{\text{ннд}}$	$h_{1,n+1}^{\text{ннд}}$	$h_{1,k}^{\text{м}}$
$h_2'(\cdot) \vee h_2(\cdot)$	$h_{2,n}^{\text{нд}}$	$h_{2,n+1}^{\text{ннд}}$	$h_{2,k}^{\text{м}}$
$h_3'(\cdot) \vee h_3(\cdot)$	$h_{3,n}^{\text{д}}$	$h_{3,n+1}^{\text{ннд}}$	$h_{3,k}^{\text{м}}$
$h_4'(\cdot) \vee h_4(\cdot)$	$h_{4,n}^{\text{вд}}$	$h_{4,n+1}^{\text{ннд}}$	$h_{4,k}^{\text{м}}$
$h_5'(\cdot) \vee h_5(\cdot)$	$h_{5,n}^{\text{нвд}}$	$h_{5,n+1}^{\text{ннд}}$	$h_{5,k}^{\text{м}}$
. . .	. . .	. . .	. . .
$h_{71}'(\cdot) \vee h_{71}(\cdot)$	$h_{71,n}^{\text{ннд}}$	$h_{71,n+1}^{\text{нвд}}$	$h_{71,k}^{\text{в}}$
$h_{72}'(\cdot) \vee h_{72}(\cdot)$	$h_{72,n}^{\text{нд}}$	$h_{72,n+1}^{\text{нвд}}$	$h_{72,k}^{\text{в}}$
$h_{73}'(\cdot) \vee h_{73}(\cdot)$	$h_{73,n}^{\text{д}}$	$h_{73,n+1}^{\text{нвд}}$	$h_{73,k}^{\text{в}}$
$h_{74}'(\cdot) \vee h_{74}(\cdot)$	$h_{74,n}^{\text{вд}}$	$h_{74,n+1}^{\text{нвд}}$	$h_{74,k}^{\text{в}}$
$h_{75}'(\cdot) \vee h_{75}(\cdot)$	$h_{75,n}^{\text{нвд}}$	$h_{75,n+1}^{\text{нвд}}$	$h_{75,k}^{\text{в}}$

Таблица 4.2 Множество состояний функционирования $\mathcal{H}$ для различных моментов времени

Состояние $h_l(\cdot)$	Состояния элементов множества $\mathcal{H}$		
	$\text{h}_{li}(t)$	$h_{li+1}(t)$	$h_{lk}(t)$
1	2	3	4
$h_1(\cdot)$	$h_{1,n}^{\text{ннд}}$	$h_{1,n+1}^{\text{ннд}}$	$h_{1,k}^{\text{м}}$
$h_2(\cdot)$	$h_{2,n}^{\text{нд}}$	$h_{2,n+1}^{\text{ннд}}$	$h_{2,k}^{\text{м}}$
$h_3(\cdot)$	$h_{3,n}^{\text{д}}$	$h_{3,n+1}^{\text{ннд}}$	$h_{3,k}^{\text{м}}$
$h_4(\cdot)$	$h_{4,n}^{\text{вд}}$	$h_{4,n+1}^{\text{ннд}}$	$h_{4,k}^{\text{м}}$
$h_5(\cdot)$	$h_{5,n}^{\text{нвд}}$	$h_{5,n+1}^{\text{ннд}}$	$h_{5,k}^{\text{м}}$
. . .	. . .	. . .	. . .
$h_{71}(\cdot)$	$h_{71,n}^{\text{ннд}}$	$h_{71,n+1}^{\text{нвд}}$	$h_{71,k}^{\text{в}}$
$h_{72}(\cdot)$	$h_{72,n}^{\text{нд}}$	$h_{72,n+1}^{\text{нвд}}$	$h_{72,k}^{\text{в}}$
$h_{73}(\cdot)$	$h_{73,n}^{\text{д}}$	$h_{73,n+1}^{\text{нвд}}$	$h_{73,k}^{\text{в}}$
$h_{74}(\cdot)$	$h_{74,n}^{\text{вд}}$	$h_{74,n+1}^{\text{нвд}}$	$h_{74,k}^{\text{в}}$
$h_{75}(\cdot)$	$h_{75,n}^{\text{нвд}}$	$h_{75,n+1}^{\text{нвд}}$	$h_{75,k}^{\text{в}}$

Таким образом, множество $\mathcal{H}$ содержит $N = 75$ состояний функционирования (см. табл. 4.1, полная таблица приведена в работе автора [15]). В ней по строкам приведены значения $h'_{l\,i}$ для фиксированного момента времени при управлении в одной из камер; мера доверия к достижению требуемому качеству материала на выходе сушильной установки приведена для контролируемой камеры [15].

Аналогично строится таблица для состояний функционирования $h_l^{\text{к}}(\cdot) = \left(h_{li}^{\text{к}}, h_{li+1}^{\text{к}}, h_{lk}\right)$, идентифицируемых по значениям влажности материала на выходе сразу двух камер (i-ой и $(i+1)$-ой), описываемых вектором $y^{\text{к}} = \left(\varphi_{n=i}^{\text{к}}, \varphi_{n+1=i+1}^{\text{к}}, m(\varphi_k^{\text{к}})\right)$.

Заметим, что мера доверия к достижению требуемого качества продукции на выходе сушильной установки определяется для материала, находящегося в фиксированный момент времени t в $(i+1)$-ой камере (см. табл. 4.2, полная таблица в работе автора [15]).

Проведя анализ данных таблиц, выделим следующие классы, соответствующие различным алгоритмам управления, на множестве состояний функционирования.

I. Класс ситуаций $K_{\text{о}}$, характеризующийся тем, что значения влажности материала в контролируемых камерах принадлежат допустимому диапазону:

$$\left(\varphi_n \in Y_n^{\text{доп}}\right) \wedge \left(\varphi_{n+1} \in Y_{n+1}^{\text{доп}}\right). \tag{4.35}$$

Класс ситуаций $K_{\text{о}}$ содержит ситуации:

$$K_{\text{о}} = \{h_{28}(\cdot), h_{33}(\cdot), h_{36}(\cdot), h_{37}(\cdot), h_{38}(\cdot), h_{53}(\cdot), h_{58}(\cdot), h_{61}(\cdot), h_{62}(\cdot), h_{63}(\cdot), h'_{28}(\cdot), h'_{33}(\cdot), h'_{36}(\cdot), h'_{37}(\cdot), h'_{38}(\cdot)\}. \tag{4.36}$$

II. Класс ситуаций $K_{\text{Пр}}$, характеризующийся тем, что значения влажности материала в контролируемых камерах ниже допустимых, или намного ниже допустимых. В этом случае можно повысить производительность процесса без

ухудшения качества выпускаемого материала. Класс $K_{\text{Пр}}$ состоит из следующих ситуаций:

$$K_{\text{Пр}} = \{h_{26}(\cdot),\ h_{27}(\cdot),\ h_{31}(\cdot),\ h_{32}(\cdot),\ h_{51}(\cdot),\ h_{52}(\cdot),\ h_{56}(\cdot),\ h_{57}(\cdot),\ h'_{26}(\cdot),\ h'_{27}(\cdot),\ h'_{31}(\cdot),\ h'_{32}(\cdot)\}. \quad (4.37)$$

III. Класс ситуаций K_{n}, характеризующийся тем, что значения влажности материала в n-ой камере выходят за допустимые пределы, а в $(n+1)$-ой камере – принадлежат допустимому диапазону:

$$\left(y_n > \bar{y}_n + \delta_n^{(1)}\right) \wedge \left(y_{n+1} < \bar{y}_{n+1} + \delta_{n+1}^{(1)}\right). \quad (4.38)$$

Класс K_{n} состоит из следующих ситуаций:

$$K_n = \{h_{39}(\cdot),\ h_{40}(\cdot),\ h_{64}(\cdot),\ h_{65}(\cdot),\ h'_{14}(\cdot),\ h'_{15}(\cdot)\}. \quad (4.39)$$

IV. Класс ситуаций $K_{\text{n+1}}$, характеризующийся тем, что значения влажности материала в n-ой камере принадлежат допустимому диапазону, а в $(n+1)$-ой камере – выходят за допустимые пределы:

$$\left(y_{n+1} > \bar{y}_{n+1} + \delta_{n+1}^{(1)}\right) \wedge \left(y_n < \bar{y}_n + \delta_n^{(1)}\right). \quad (4.40$$

Класс $K_{\text{n+1}}$ состоит из следующих ситуаций:

$$K_{n+1} = \{h_{18}(\cdot),\ h_{23}(\cdot),\ h'_{43}(\cdot),\ h'_{48}(\cdot)\}. \quad (4.41)$$

V. Класс ситуаций $K_{\text{n,n+1}}$, характеризующийся тем, что значения влажности материала в обоих контролируемых камерах выходят за допустимые пределы:

$$\left(y_n > \bar{y}_n + \delta_n^{(1)}\right) \wedge \left(y_{n+1} > \bar{y}_{n+1} + \delta_{n+1}^{(1)}\right). \quad (4.42)$$

Класс $K_{\text{n,n+1}}$ состоит из наибольшего количества ситуаций:

$$K_{n,n+1} = \{h_{16}(\cdot), h_{17}(\cdot), h_{19}(\cdot), h_{20}(\cdot), h_{21}(\cdot), h_{22}(\cdot), h_{24}(\cdot), h_{25}(\cdot), h_{29}(\cdot),$$
$$h_{30}(\cdot), h_{34}(\cdot), h_{35}(\cdot), h_{54}(\cdot), h_{55}(\cdot), h_{59}(\cdot), h_{60}(\cdot), h'_4(\cdot), h'_5(\cdot), h'_9(\cdot),$$
$$h'_{10}(\cdot), h'_{19}(\cdot), h'_{20}(\cdot), h'_{24}(\cdot), h'_{25}(\cdot), h'_{41}(\cdot), h'_{42}(\cdot), h'_{46}(\cdot), h'_{47}(\cdot)\}. \quad (4.43)$$

Важное значение при эффективном функционировании систем третьего и четвертого классов на МСФ, как подчеркивал Ю.Л.Муромцев [185], имеет выполнение так называемых условий включаемости. Будем называть систему *включаемой для состояния* функционирования $h_l(\cdot) \in \mathcal{H}$ в случае, если управляющее устройство сушильной установки вырабатывает управляющее воздействие $u(h_l(\cdot))$, обеспечивающее требуемое качество выпускаемого продукта в пределах времени его прохождения по всем камерам. Будем называть систему *включаемой на МСФ*, когда условие включаемости выполняется для всех состояний функционирования, т.е. для $\forall h_l(\cdot) \in \mathcal{H}$.

Как показывают проведенные исследования, условие включаемости выполняется для классов ситуаций $K_{\text{о}}$ и $K_{\text{Пр}}$. Для других классов ситуаций с целью обеспечения требуемого качества выпускаемого продукта необходимо вырабатывать соответствующее корректирующее управляющее воздействие.

Методика полного анализа решения задачи управления на МСФ была использована при разработке алгоритмизации синтеза управляющих воздействий, лежащего в основе функционирования ИИУС ТТА [209].

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_n и φ_{n+1}, определенные по аналитическим моделям вида (3.53) с использованием интеллектуального датчика; мера доверия к требуемой конечной влажности материала, рассчитанная по процедурной модели $m(\varphi_k^{\text{к}}) = \text{Алг}_{\text{ДШ}}(\varphi_n, \varphi_{n+1}, \text{э})$ методом Демпстера-Шафера, где э – экспертные знания в виде числовых оценок;

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 имеющихся лингвистических переменных [209].

Выводы по четвертой главе

1. Проведен полный анализ энерго- или ресурсосберегающего управления на множестве состояний функционирования для инерционного объекта первого порядка для режима «Пуск». Сформулированы и доказаны леммы об анализе и синтезе энерго- и ресурсосберегающего управления динамическими режимами объектов, составляющих ТТА, на МСФ при функционалах вида затраты энергии, расход топлива.

2. Предложена концепция и проведен расширенный анализ с учетом ДФ режима «Пуск». Наличие дестабилизирующих факторов по каналу управления приводит к тому, что внешние границы области существования решения ЗОУ превращаются в «коридоры» некоторой ширины, зависящей от интенсивности помехи. Существование решения при наличии помехи зависит от места расположения точки (A,L) в области на синтезирующей плоскости.

3. Разработаны расширенные стратегии энерго- и ресурсосберегающего управления с учетом наличия дестабилизирующих факторов в каналах управления и измерения режима «Пуск». Отношение сигнала к шуму в ИИУС ТТА определяет выбор стратегии управления. Когда интенсивность шума мала, используют программную стратегию управления. Иначе, применяют позиционную стратегию.

4. Разработана методика интеллектуального синтеза управляющего воздействия на МСФ режима «Пуск» при реальной эксплуатации ИИУС ТТА без лица принимающего решение.

5. Проведен анализ и интеллектуальный синтез управляющих воздействий режима «Процесс» на МСФ. Применительно к решаемым задачам управления введено понятие состояния функционирования для многосекционной сушильной установки, и определены множества ситуаций, характеризующих различные состояния ТТА. Определены классы ситуаций, соответствующие различным алгоритмам управления, на множестве состояний функционирования.

5 АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО–УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Для решения сформулированных задач необходимо разработать алгоритмическое и методологическое обеспечение ИИУС ТТА, которое составляет основу работы функциональных программных модулей и позволяет достигать поставленные цели. В главе рассматриваются алгоритмы синтеза управляющего воздействия в режиме «Пуск», в том числе с учетом влияния ДФ по каналам управления и измерения, и синтеза управляющего воздействия в режиме «Процесс» с применением нечеткой логики и интеллектуального датчика влажности материала.

5.1 Алгоритм синтеза оптимальной программы управления при использовании многозонных моделей в режиме «Пуск»

Наиболее важными задачами при разработке ИИУС ТТА являются идентификация модели динамики объекта и синтез оптимальных управляющих воздействий [38].

Будем полагать, что объект управления имеет следующие свойства:

1. Воспроизводимость первых двух составляющих вектора фазовых координат (т.е. траектории фазовых координат $z_1(\cdot)$, $z_2(\cdot)$ повторяются при одних и тех же управляющих воздействиях).

2. В каждый момент времени действует только один вид скалярного управления.

3. Допускается ограниченное число разрывов (скачков) функций $z_1(t)$, $z_2(t)$ изменения фазовых координат.

4. Объект в энергетическом отношении не является изолированным от окружающей среды.

Задача энергосберегающего управления с многозонной моделью вида (2.17) формулируются аналогично задаче (2.8)–(2.11), причем массив реквизитов для нее имеет вид

$$\tilde{R} = (a_1,...,a_{m_i}, b_1,...,b_{m_i}, z^0, z^k, z_1,...,z_{m_i-1}, u_н, u_в, t_0, t_k, I) \qquad (5.1)$$

Следует отметить, что для различных зон границы $u_н$ и $u_в$ могут быть различными. При рассмотрении задачи энергосберегающего управления на МСФ могут меняться любые компоненты массива $\tilde{R}$, а также число зон m_i.

Для решения задачи энергосберегающего управления с массивом исходных данных (5.1) используются метод синтезирующих переменных (МСП) и программная стратегия управления $S_{пр}$, при этом оптимальное управление ищется в виде программы

$$\tilde{u}^*(\cdot) = (\tilde{u}_1^*(t),\ t \in [t_0, t_1^*);\ \tilde{u}_2^*(t),\ t \in [t_1, t_2^*);\ ...\tilde{u}_{m_i}^*(t),\ t \in [t_{m_i-1}^*, t_k];), \qquad (5.2)$$

где $t_i^*, i = \overline{1,\ m_i - 1}$ – моменты "оптимального" переключения зон, т.е. $t_i^* = \arg z_i^*(t_i)$.

Таким образом, расчет оптимальной программы (5.2) связан с определением видов функций $\tilde{u}_i^*(t)$, $i = \overline{1,\ m_i - 1}$, и расчетом параметров этих функций и моментов переключения t_i^* зон модели [261].

Существование решения задачи энергосберегающего управления с массивом (5.1) определяется следующей леммой.

Лемма 5.1. Пусть для задачи энергосберегающего управления с массивом исходных данных (5.1) при $z^k > z^0$ моменты переключения зон модели $\bar{t}_i$, $i = \overline{1,\ m_i - 1}$ вычисляются по формуле

$$\bar{t}_i = \bar{t}_{i-1} + \frac{1}{a_i} \ln \frac{a_i z_i + b_i u_{вi}}{a_i z_{i-1} + b_i u_{вi}}, \qquad (5.3)$$

а при $z^k < z^0$ – по формуле

$$\bar{t}_i = \bar{t}_{i-1} + \frac{1}{a_i} \ln \frac{a_i z_i + b_i u_{\text{н}i}}{a_i z_{i-1} + b_i u_{\text{н}i}}. \tag{5.4}$$

Тогда решение задачи существует, если на интервале времени

$$\left[t_0 + \sum_{i=1}^{m_i - 1} (\bar{t}_i - \bar{t}_{i-1});\ \ t_k \right], \tag{5.5}$$

найдется $u_{m_i}(t) \in [u_{\text{н}}, u_{\text{в}}]$ для, которого выполняется условие

$$z^k - z_{m_i - 1} e^{a_{m_i}(t_k - \bar{t}_{m-1})} = b_{m_i} \int_{\bar{t}_{m_i - 1}}^{t_k} e^{a_{m_i}(t_k - t)} u_{m_i}(t) dt. \tag{5.6}$$

Доказательство. Возможны два случая задания границ z^0 и z^k. Первый случай, когда $z^k > z^0$ (см. рис. 5.1), соответствует задачам разогрева тел. Рассмотрим участок фазовой траектории первой зон модели (2.17), т.е.

$$z(\cdot) = (z(t),\ \ t \in [t_0, t_1]\ \ /\ \ z(t_0) = z_0,\ \ \ z(t_1) = z_1). \tag{5.7}$$

Для первой зоны согласно формуле Коши можно записать

$$z_1 = z^0 e^{a_1(t_1 - t_0)} + b_1 \int_{t_0}^{t_1} e^{a_1(t_1 - t)} u_1(t) dt. \tag{5.8}$$

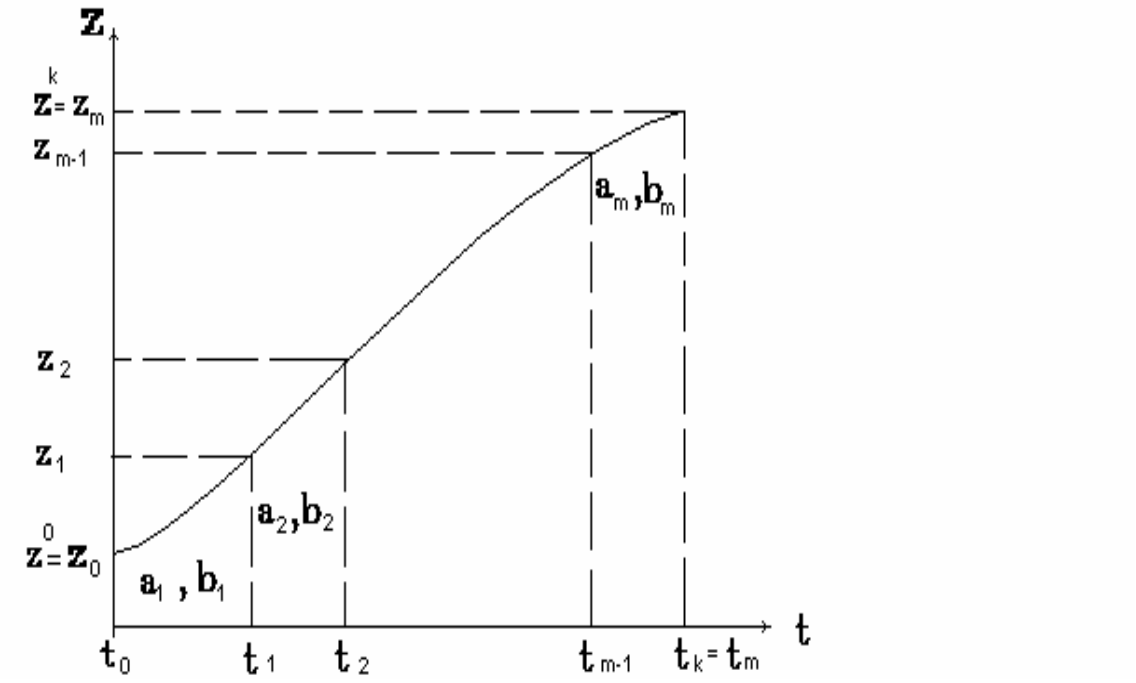


Рисунок 5.1. Траектория изменения фазовой координаты $z_{m_i}(t)$.

И при $u_1(t) = u_{1в}$ время $\bar{t}_1$ перехода из состояния z^0 в $z(\bar{t}_1) = z_1$ равно

$$\bar{t}_1 = \bar{t}_0 + \frac{1}{a_1} \ln \frac{a_1 z_1 + b_1 u_{1в}}{a_1 z_0 + b_1 u_{1в}}. \tag{5.9}$$

Это – минимальное время, за которое можно перевести объект из состояния z^0 в z_1.

Аналогично, используя (5.8) для второй зоны время $\bar{t}_2$ равно

$$\bar{t}_2 = \bar{t}_1 + \frac{1}{a_2} \ln \frac{a_2 z_2 + b_2 u_{в2}}{a_2 z_1 + b_2 u_{в2}}$$

и т.д.

Таким образом, переход из состояния z^0 в $z_{m_i-1} = z(\bar{t}_{m_i-1})$, можно осуществить за время

$$\bar{t}_{m_i-1} - t_0 = \sum_{i=1}^{m_i-1} (\bar{t}_i - \bar{t}_{i-1}).$$

Для последней m_i-ой зоны переход из z_{m_i-1} в z^k возможен, если найдется управление $u_{m_i}(t)$ такое, что

$$\forall t \in [\bar{t}_{m_i-1}, t^k] \quad u_{m_i}(t) \in [u_{нm_i}, u_{вm_i}]$$

и выполняется условие (5.6). Следовательно, для случая $z^k > z^0$ лемма доказана.

Аналогично доказывается лемма для случая $z^k < z^0$, т.е. когда рассматриваются задачи охлаждения.

Лемма 5.1 позволяет сформулировать ряд следствий.

<u>Следствие 1 леммы 5.1</u>. Для условий леммы 5.1 решение задачи при $z^k > z^0$ существует, если выполняется неравенство

$$u_{вm_i} \geq \frac{z^k - z_{m_i-1} e^{a_{m_i}(t_k - \bar{t}_{m_i-1})}}{e^{a_{m_i}(t_k - \bar{t}_{m_i-1})} - 1} \cdot \frac{a_{m_i}}{b_{m_i}}, \tag{5.10}$$

а при $z^k < z^0$ решение существует, если

$$u_{\text{нт}_i} \le \frac{z^k - z_{m_i-1} e^{a_{m_i}(t_k - \bar{t}_{m_i-1})}}{e^{a_{m_i}(t_k - \bar{t}_{m_i-1})} - 1} \cdot \frac{a_{m_i}}{b_{m_i}}. \qquad (5.11)$$

Следствие 2 леммы 5.1 Если для задаваемых исходных данных (5.1) в формуле (5.10) (или (5.11)) имеет место равенство, то решение ЗОУ единственно и равно при $z^k > z^0$

$$u(\cdot) = (u_{\text{в}1}(t), t \in [t_0, \bar{t}_1); u_{\text{в}2}(t), t \in [\bar{t}_1, \bar{t}_2); ...; u_{вт_i}(t),\ t \in [\bar{t}_{m_i-1}, \bar{t}_k]), \qquad (5.12)$$

а при $z^k < z^0$

$$u(\cdot) = (u_{\text{н}1}(t), t \in [t_0, \bar{t}_1);\ u_{н2}(t),\ t \in [\bar{t}_1, \bar{t}_2); ...; u_{нт_i}(t), t \in [\bar{t}_{m_i-1},\ \bar{t}_k]). \qquad (5.13)$$

Следствие 3 леммы 5.1 Если для нелинейного объекта с моделью (2.17) получена фазовая траектория

$$z(\cdot) = (z(t),\ \ t \in [t_0', t_k']\ \ /\ \ z(t_0') = z_0,\ \ z(t_k') = z^k) \qquad (5.14)$$

при выполнении условий (2.18), (2.19) и ограничений (2.20), (2.21) то имеет место:

а) решение задачи с исходными данными (5.1) существует, если

$$(t_k - t_0) \ge (t_k' - t_0'); \qquad (5.15)$$

б) в случае наличия участков времени, когда $u(t)$ находится внутри интервала $(u_{\text{н}}, u_{\text{в}})$, решение задачи с данными (5.1) существует и при несколько меньшем (t_k, t_0) по сравнению с (t_k', t_0');

в) если траектория (5.14) получена при $u(t) = u_{\text{в}}$ (или $u(t) = u_{\text{н}}$)

$$(t_k - t_0) = (t_k' - t_0'),$$

то решение задачи с данными (5.1) единственно и равно (5.12) или (5.13)).

Следствие 4 леммы 5.1. Если модель (2.17) адекватна объекту, и для ЗОУ с исходными данными (5.1) выполняется условие (5.10) (или (5.11)), то решение ЗОУ (2.9)–(2.11) для нелинейного объекта существует.

При программной стратегии необходимо найти траекторию оптимального управляющего воздействия $u^*(\cdot)$.

На основании рассмотренных выше лемм алгоритм расчета оптимальной программы (5.2) заключается в следующем [261].

1. Задаются интервалы возможных значений моментов переключения зон модели $\Im = \{[t_{1н}, t_{1в}], [t_{2н}, t_{2в}], ..., [t_{m_i-1,н}, t_{m_i-1,в}]\}$ и шаги ∂t_i изменения $t_1, ..., t_{m_i-1}$ по зонам.

2. Вычисляются $u_{m_i}(t)$ и ее параметры на основе лемм 4.1–4.5 и их следствий (см. раздел 4.1) значения функционала для последней зоны при различных $t_{m_i-1} \in [t_{m_i-1,н}, t_{m_i-1,в}]$.

3. Используя идею динамического программирования, рассчитываются составляющие программы управления для двух последних зон и т.д., пока не будет получена программа (5.2).

4. Проверяется выполнение условия $\forall i \in [1,2,..., m_i - 1]\ t_i \in (t_{iн}, t_{iв})$.

Если данное условие выполняется, то оптимальное управление $u^*(\cdot)$ получено. Если же для одной или нескольких зон t_i находится строго на границе интервала, то соответствующая граница смещается в сторону расширения интервала, и этапы 2, 3, 4 повторяются. Расчет оптимальной программы связан с определением видов функций, расчетом параметров ОУ для каждой зоны отдельно и решением задачи их временной стыковки.

Задача временной стыковки заключается в определении оптимального значения времен t_i^* переключения программ. Для их расчета используется модернизированный метод динамического программирования. От обычного метода он отличается тем, что на каждом шаге находится оптимальное управление с использованием метода синтезирующих переменных. Кроме того, для момента времени t_1 осуществляется стыковка скорости изменения фазовых координат в конце первой и начале второй зоны модели.

Реализация алгоритма синтеза оптимальной программы управления в ИИУС ТТА применяется в случае идентификации динамики объекта управления многозонными моделями.

5.2 Алгоритмы и методы синтеза управляющих воздействий с учетом дестабилизирующих факторов в режиме «Пуск»

Алгоритмы синтеза управляющих воздействий зависят от стратегии реализации оптимального управляющего воздействия. Наряду с основными алгоритмами, не учитывающими влияние ДФ, реализующими программную $S_{\text{пр}}$ и позиционную $S_{\text{пз}}$ стратегии, ИИУС ТТА использует алгоритмы, реализующие стратегии управления с учетом ДФ, действующих по каналам управления и измерения, такие как: с фильтром Калмана ($S_{\text{ФК}}$); с прогнозирующей моделью ($S_{\text{ПМ}}$); с корректируемой стратегией (применение нечеткой логики) (S_{AP}); с комбинированной стратегией ($S_{\text{комб}}$).

5.2.1. Алгоритм позиционного энергосберегающего управления

При позиционной стратегии $S_{\text{пз}}$ энергосберегающее управление u_i^* рассчитывается на каждом шаге с учетом текущего значения выходной переменной y_i и других компонент массива реквизитов. Алгоритм расчета задается синтезирующей функцией S, т.е.

$$u_i^* = S(y_i, R), \quad i = \overline{1, N}. \tag{5.16}$$

Синтезирующая функция аналитически выводится на этапе анализа задачи энергосберегающего управления и на каждом шаге однозначно определяет энергосберегающее управляющее воздействие u_i^*, необходимое для достижения цели управления с минимумом функционала. Однако при выработке

оптимальных управляющих воздействий на них оказывает влияние ДФ в канале управления, что приводит к неточной реализации управляющих воздействий и снижению вероятности выполнения цели управления.

В условиях неопределенности параметров объекта программная и позиционная стратегии имеют ряд недостатков. Программная стратегия уступает позиционной в точности выхода в заданную область $\chi^к$, хотя и дает более высокий показатель энергосбережения.

Пусть синтезируемый регулятор решает задачу синтеза управляющих воздействий с закрепленными концами траектории изменения фазовых координат и минимуме функционала «затраты энергии», при наличии ДФ в каналах управления и измерения

$$x_{i+1} = Fx_i + Gu_i^*,\ y_i = Cx_i + v_i,$$

$$u_i^* = s_{Z(H)}(y_i,\ N-i,\ \Re) + w_i,\ H \in \{h_1,\ h_2,\ h_3\},$$

$$J_э = \delta t \sum_{i=0}^{N-1} u_i^2 \to \min,$$

$$\forall\, i \in [0,\ N-1],\ u_i \in [u_н,\ u_в], \qquad (5.17)$$

$$x_0 = x^0,\ x_N \in \chi^к,$$

$$\overline{w} = 0,\ E[w_i,\ w_j^T] = R \cdot \delta(i, j),$$

$$\overline{v} = 0,\ E[v_i, v_j^T] = Q \cdot \delta(i, j),$$

где x_i, y_i – значения вектора фазовых координат и выходной переменной на i-ом шаге, u_i – скалярное управление, w_i, v_i – вектор ДФ в каналах управления и измерения; F, G, C – матрицы коэффициентов; $J_э$ – минимизируемый функционал “затраты энергии”; δt – временной шаг дискретизации; N – число шагов на интервале управления; $u_н, u_в$ – границы изменения управляющего воздействия; x^0 – начальное значение вектора x, $\chi^к$ – конечная область, в которую следует перевести объект, H – множество состояний функционирования объекта управления, Π – область существования решения

задачи энергосберегающего управления, k_1, k_2, k_3 – области (зоны) видов функции оптимального управления в $\Pi = k_1 \cup k_2 \cup k_3$, соответствующих состояниям h_1, h_2, h_3 (см. об этом также в работе автора [18]).

Здесь под изменением состояния функционирования понимается переход вектора синтезирующих переменных из одной области, характеризующей вид функции оптимального управления, в другую. В общем случае под изменениями состояния функционирования понимаются изменения различных факторов, например, интенсивности шумов, параметров модели объекта, ограничений на управляющее воздействие и т.д.

При позиционной стратегии на каждом шаге следует вычислять значения вектора синтезирующих переменных. При полном отсутствии ДФ, действующих на объект, траектория движения вектора Λ меняется плавно, и он может переходить в соседнюю зону, а также выходить из области Θ. Это приводит к увеличению затрат энергии при управлении. На эту ситуацию может влиять ряд причин, таких как погрешности идентификации и аппроксимации параметров объекта, систематические погрешности устройств управления и измерения, выбор шага дискретизации δt и т.д.

Синтезирующие переменные

$$L(x,t,\Re) = 4\frac{x_к - x e^{a(t_к - t)}}{b(u_в - u_н)(t_к - t)} - 2\frac{(u_в + u_н)\left(e^{a(t_к - t)} - 1\right)}{a((u_в - u_н)(t_к - t))}$$

и

$$A(t) = \frac{a(t_к - t)}{2}$$

однозначно определяют область Π. Эти переменные образуют вектор

$$\Lambda = \left(L(x,\ t,\ \Re),\ A(t)\right)^{\mathrm{T}}.$$

При оптимальном управлении с применением метода синтезирующих переменных (МСП) на каждом шаге:

1) производится расчет значений вектора синтезирующих переменных;

2) определяется зона k_i в области существования решения Π;

3) определяется вид функции управления;

4) рассчитывается управляющее воздействие.

Предлагается модифицировать алгоритм расчета управляющего воздействия МСП за счет добавления времени корректировки $t_{кор}$, с использованием формулы для расчета времени $t = t_0 + i\delta t + t_{кор}$. Это позволит уточнять управляющее воздействие на интервале дискретизации времени.

Результаты вычислительного эксперимента модифицированного алгоритма МСП с массивами исходных данных $\Re_1 = (-0{,}092;\ 0{,}1;\ -3;\ 3;\ 10;\ [0{,}1;\ 0{,}1];\ 0;\ 20;\ 1;\ 0;\ 0)$ и $\Re_2 = (-0{,}1306;\ 0{,}2692;\ 0;\ 350;\ 355;\ [540;\ 560];\ 0;\ 6{,}5;\ 0{,}5;\ 0;\ 0)$ проиллюстрированы на рис. 5.2.

В обоих случаях отмечалось снижение затрат энергии.

ДФ, действующие на объект, также изменяют траекторию движения вектора синтезирующих переменных. При этом значения вектора могут скачкообразно попадать то в одну, то в другую зону или выходить за границы существования решения [28, 29].

Другим возможным методом синтеза управляющего воздействия является классический алгоритм аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР). В алгоритме АКОР для расчета управляющего воздействия вне зависимости от зоны используется формула для зоны k_1 (4.31), которая в общем случае может быть сведена к известной формуле Эйлера-Лагранжа [5].

Сравним алгоритмы МСП и АКОР на примере ЗОУ с массивами реквизитов $R_1 = (-0{,}092;\ 0{,}1;\ -3;\ 3;\ 10;\ -0{,}2;\ 0{,}2;\ 0;\ 16;\ 1;\ 0{,}1;\ 0{,}1)$, $R_2 = (-0{,}1306;\ 0{,}2692;\ 0;\ 350;\ 355;\ 540;\ 560;\ 0;\ 6{,}5;\ 0{,}5;\ 10;\ 10)$.

На рис. 5.3 показаны траектории изменения синтезирующих переменных, а также приведены границы зон и области существования решения ЗОУ.

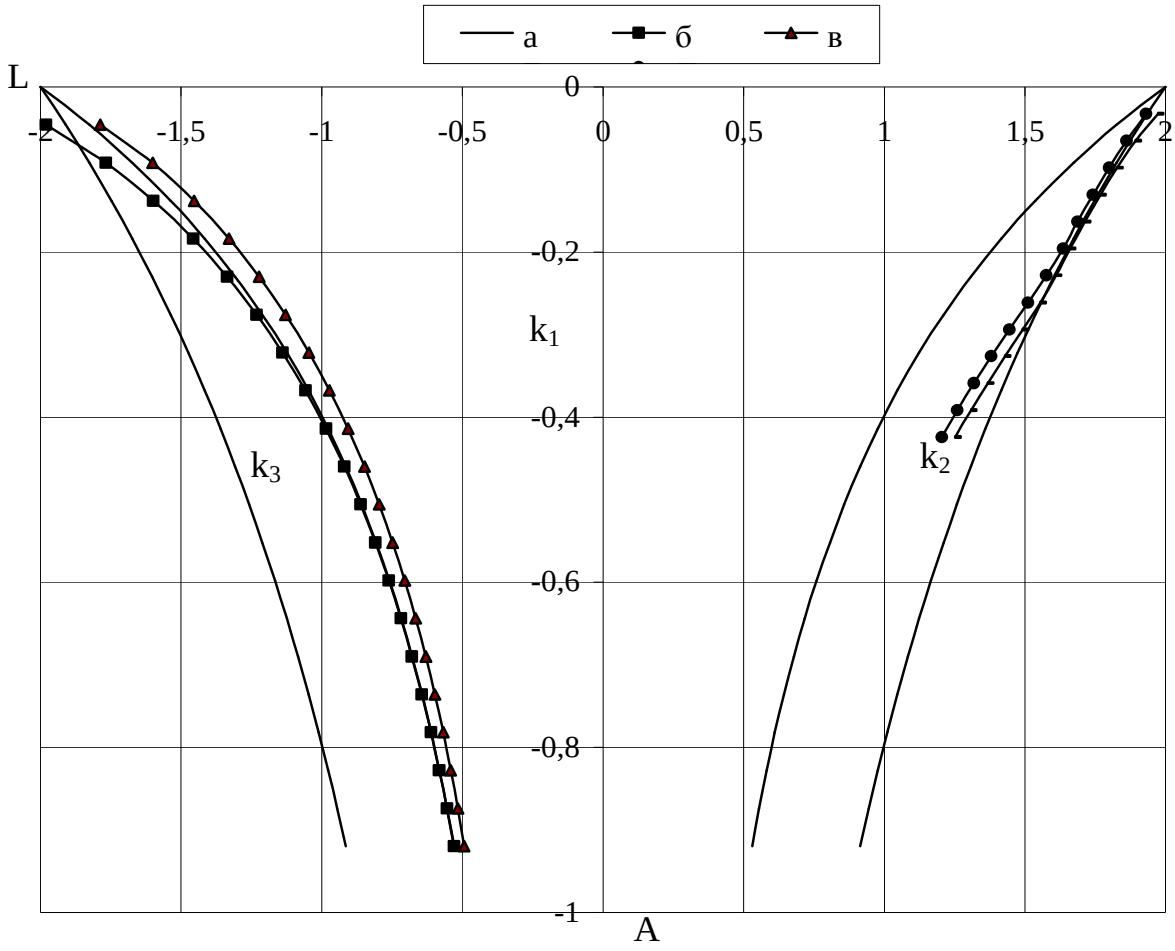


Рисунок 5.2. Траектории вектора синтезирующих переменных без ДФ при управлении с использованием МСП а – границы зон и области существования решения ЗОУ «охлаждение» ($t = 20$); б – траектория вектора без учета $t_{кор}$; в – траектория вектора с учетом $t_{кор}$. «нагрев» ($t = 6{,}5$); г – траектория вектора без учета $t_{кор}$; д – траектория вектора с учетом $t_{кор}$.

При использовании МСП траектория изменения вектора синтезирующих переменных может выходить из области существования решения задачи управления. В этом случае управление рассчитывается по максимальному граничному значению. Что приводит к увеличению затрат энергии, но выход на заданный режим осуществляется более точно. При использовании АКОР управление не учитывает выход за границу существования решения и, таким образом, выход на заданный режим осуществляется не точно, что может привести к невыполнению задачи управления. В таблицах 5.1 и 5.2 приведены

значения функционалов с использованием алгоритмов МСП и АКОР по выборкам в 100 опытов.

Таблица 5.1. Таблица сравнения алгоритмов МСП и АКОР реализации управления при охлаждении.

	$t_{кор}$	$t_к$	МСП	АКОР
$J_э$	Нет	20	45,5311	45,2098
y_N			0,0501	0,0521
$J_э$	Да		38,4446	38,1459
y_N			0,1785	0,1821
$J_э$	Нет	16	100,9809	78,9955
y_N			0,0904	0,29138
$J_э$	Да		85,0462	70,3183
y_N			0,2512	0,4049

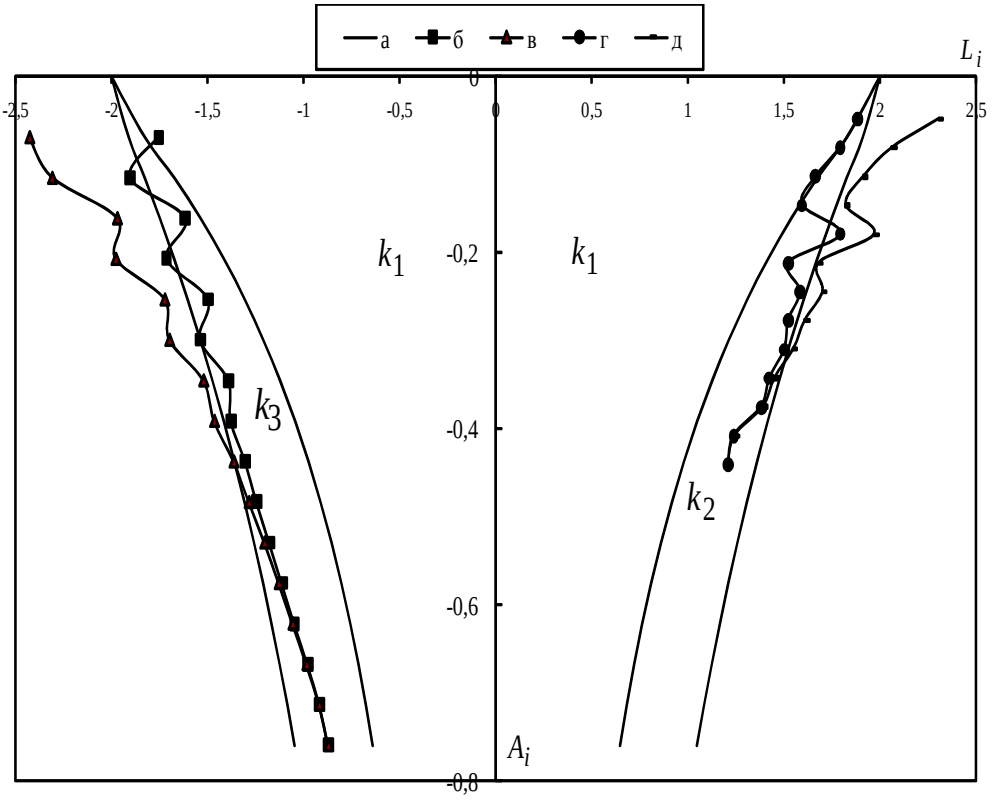


Рисунок 5.3. Траектории вектора синтезирующих переменных с ДФ

а – границы зон k_j и области существования решения ЗОУ; б – траектория L_i для R_1 (МСП); в – траектория L_i для R_1 (АКОР); г – траектория L_i для R_2 (МСП); д – траектория L_i для R_2 (АКОР).

Для сравнения алгоритмов управления методик МСП и АКОР также можно использовать два скалярных критерия: минимума функционала

($J_э \to \min$) и точности достижения цели управления (минимума отклонения конечного значения фазовой координаты $\left|z^к - z_N\right| \to \min$). Результаты сравнения приведены в таблице 5.3 (усредненные данные по выборке в 100 опытов).

Таблица 5.2. Таблица сравнения алгоритмов МСП и АКОР реализации управления при нагреве

	$t_{кор}$	$t_к$	МСП	АКОР
$J_э$	Нет	8,5	762151,3226	748712,0538
y_N			541,042117	538,874093
$J_э$	Да		743527,3388	729996,2257
y_N			536,757875	534,16244
$J_э$	Нет	6,5	692767,954	660580,0122
y_N			540,49763	534,375702
$J_э$	Да		673771,9474	642664,6218
y_N			535,402061	528,895077

Таблица 5.3. Усредненные результаты сравнения алгоритмов МСП и АКОР

Массив реквизитов	Критерий	Алгоритм	
		МСП	АКОР
R_1	$J_э$	75,052	70,323
	$\left|z^к - z_N\right|$	0,151	0,41
R_2	$J_э$	653771	642664
	$\left|z^к - z_N\right|$	542,402	528,891

Как видно из таблиц, независимо от массива реквизитов задачи управления использование МСП приводит, при некотором увеличении затрат на управление по сравнению с АКОР, к более точному попаданию фазовой координаты в центр конечной области.

Для повышения точности реализации управляющих воздействий возможно применение алгоритмических методов прогнозирования и компенсации дестабилизирующих факторов в канале управления на этапе синтеза управляющих воздействий [38]. Их применение делает более эффективным функционирование системы управления, а также минимизирует затраты энергии, связанные с неточностью реализации управляющих воздействий [28].

5.2.2 Алгоритм синтеза управляющих воздействий с прогнозирующей моделью

Рассмотрим алгоритм прогнозирования и компенсации «цветного» шума в канале управления на основе метода параметрических функций [231]. Для снижения влияния шума в канале управления w_{i} введем компенсационную добавку $\tilde{w}_i$, определяемую путем оптимального линейного прогноза в простейшем случае по формуле [38]

$$\tilde{w}_i = \overline{w} + \rho(w_{i-1} + \overline{w}), \tag{5.18}$$

$$\rho = \frac{1}{(N_{в}-1)\sigma_w^2}\sum_{i=1}^{N_{\text{в}}-1}(w_i - \overline{w})(w_{i+1} - \overline{w}),$$

где ρ – параметр прогнозирующей модели (5.18); σ_w^2 – дисперсия w_i, $\overline{w}$ – математическое ожидание w_i, $N_{\text{в}}$ – объем выборки.

Модель (5.18) строится так, чтобы обеспечить требуемую точность прогнозирования, а также, чтобы была возможность ее реализации с помощью простого микропроцессорного устройства (см. об этом также в работе автора [38]). Могут применяться также модели авторегрессии, скользящего среднего, проинтегрированного скользящего среднего и другие. Их предполагается использовать для увеличения точности прогноза, однако, они более сложные и не всегда дают требуемый эффект. Эффективная работа системы зависит от выбранного шага дискретизации и среднеквадратичного отклонения шума, что

также необходимо учитывать. Модель прогноза окончательно выбирается с учетом имитации функционирования при различных значениях параметров системы [38].

Структурная схема синтеза оптимального управления с учетом прогноза возмущения для задачи (5.17) представлена на рисунке 5.4 (шум в канале измерения для упрощения не показан).

Имитационное моделирование проводится с целью анализа функционирования системы при различных интенсивностях дестабилизирующих факторов σ_w [152].

Была проведена имитация работы системы с различными значениями интенсивности цветного шума σ_w, и его белой составляющей σ_{w_2} и коэффициента корреляции ρ. При фиксированных значениях $N, \sigma_w, \sigma_{w_2}$ вычислялись средние значения для 100 опытов. Причем значения функции (5.18) в каждом опыте имитировались дважды – как в прямой, так и в обратной последовательности [38].

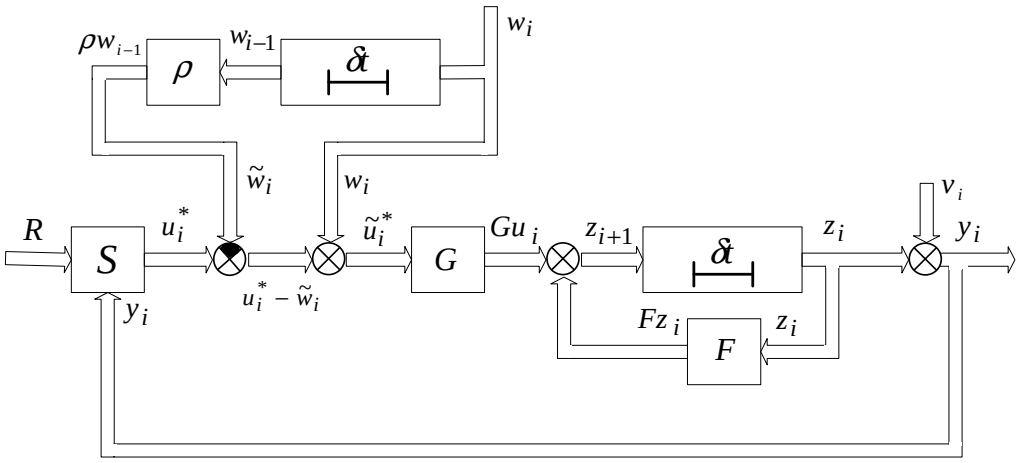


Рисунок 5.4 – Структурная схема алгоритма синтеза управляющих воздействий с прогнозом ДФ в канале управления

Рассмотрим конкретный пример проведения имитационного эксперимента. Пусть моделью динамики является инерционный объект первого порядка. При идентификации получены следующие значения параметров $a = -0{,}1053605$, $b = 0{,}20721$, пусть здесь имеем ограничение на управление

$u_i \in [u_н = -3; u_в = 3]$. Исследуемый объект необходимо перевести из начального состояния $z_0 = 10$ в конечную область $z^к \in [-0{,}1;\ 0{,}1]$ при минимуме затрат энергии [38].

По формуле

$$u_i^* = \frac{2ay_i}{b(e^{-2a(\Delta t - i\delta t)} - 1)} + w_i$$

вычислим управляющее воздействие [38]. Управляющее воздействие с учетом прогноза воздействия дестабилизирующих факторов (см. схему рис. 5.4) имеет вид:

$$\tilde{u}_i^* = \frac{2ay_i}{b(e^{-2a(\Delta t - i\delta t)} - 1)} - \tilde{w}_i + w_i\ .$$

Синтезирующая функция находилась с конечным значением z_N, за которое взята середина интервала, а именно $z_N = 0$ [38].

В результате решения задачи при различных значениях N, а также интенсивностях σ_w и σ_{w_2}, получены значения минимизируемого функционала J (без прогноза возмущения) и $J^{пр}$ (с прогнозом), а также показатели экономии энергоресурсов по формуле $\Delta J,\ \% = 100 - 100 \cdot \frac{J^{пр}}{J}$ (см. табл. 5.4). Диапазон изменения коэффициента корреляции в зависимости от числа шагов следующий $\rho = 0{,}4 \div 0{,}9$ [38]. Полученные данные (табл. 5.4) демонстрируют, что увеличение числа шагов и использование алгоритма управления с учетом прогноза дестабилизирующих факторов, действующих по каналу управления, приводят к возрастанию ресурсосбережения [38]. Траектории управления объектом для трех случаев: программного (a), с прогнозом дестабилизирующих факторов (b) и без него (c) приведены на рисунке 5.5.

Видно, что использование алгоритма прогноза дестабилизирующих факторов позволяет уменьшить колебания управляющих воздействий, в следствие чего возрастает ресурсосбережение [38].

Таблица 5.4 – Имитационное моделирование работы ИИУС ТТА

δt	σ_w	σ_{w_2}	J	$J^{\text{пр}}$	$\Delta J,\%$
1	0,5	0,2	11,84065	10,92324	7,748003
0,5	0,5	0,2	11,46157	8,225784	28,23163
0,25	0,5	0,2	11,41536	7,455179	34,69168

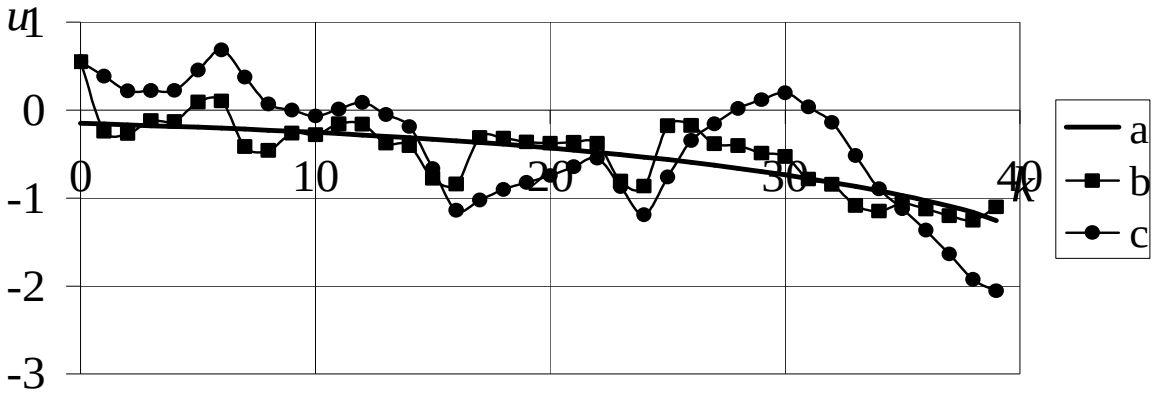


Рисунок 5.5 – Графики оптимального управления:
a – программное,
b – с прогнозом дестабилизирующих факторов,
c – без прогноза дестабилизирующих факторов при N = 40

Кроме того заметим, что коэффициент корреляции возмущения оказывает существенное влияние на ресурсосбережение (см. рис. 5.6).

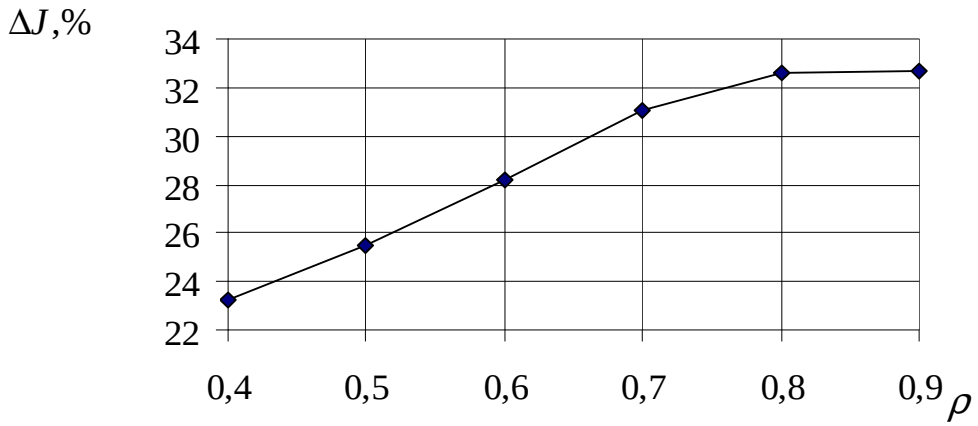


Рисунок 5.6 – Зависимость ΔJ от коэффициента корреляции ρ

Результаты работы алгоритма прогноза приводят к следующим выводам: при действии ДФ в канале управления на эффективность работы системы управления влияют величина шага дискретизации и параметры шума [38].

Использование модели прогнозирования возмущения в алгоритме управления позволяет повысить точность реализации управляющих воздействий и увеличить экономию энергии на 7-30% [38].

5.2.3 Алгоритм оптимального управления с фильтром Калмана

Учет возможных ошибок и погрешностей измерения фазовых координат в канале измерения обычно связывают с решением задачи оптимальной фильтрации, решение которой в общем виде предложил Р.Л. Стратонович. Однако, в общем случае, аналитическое решение задачи фильтрации оказывается весьма затруднительным. Для получения более простых схем используют различные упрощающие предположения, в частности, широко используется модель так называемого фильтра Калмана [89]. Ее популярность обусловлена тем, что в ней применяется рекуррентный метод формирования оценки, который позволяет избежать сложных математических вычислений. Это дает возможность реализовать фильтр Калмана в реальном масштабе времени дешевыми управляющими микропроцессорными устройствами.

Применение фильтра Калмана в синтезе оптимального управления позволяет оценить внутреннее состояние системы и повысить достоверность получаемой по каналу измерения информации, что ведет к выработке управляющих воздействий, максимально приближенных к оптимальным.

Структурная схема синтеза оптимального управления с фильтром Калмана для задачи (5.13) приведена на рисунке 5.7.

Иногда целесообразно к ограничению на управление в каждый момент времени дополнительно накладывать интегральное условие на лимит энергии так, что затраты энергии не превышали заданное допустимое значение $J_{\text{доп}}$ (см. работу автора [18]). При этом допускается расширение временного интервала

управления $[0, N\delta t]$, здесь число шагов N (при постоянном δt) должно удовлетворять условию $N \in [N_н, N_в]$.

При позиционной стратегии энергосберегающего управления с применением фильтра Калмана необходимо выявить степень влияния числа шагов и действующих дестабилизирующих факторов различной интенсивности в канале измерения на величину заданного функционала “затраты энергии” [18].

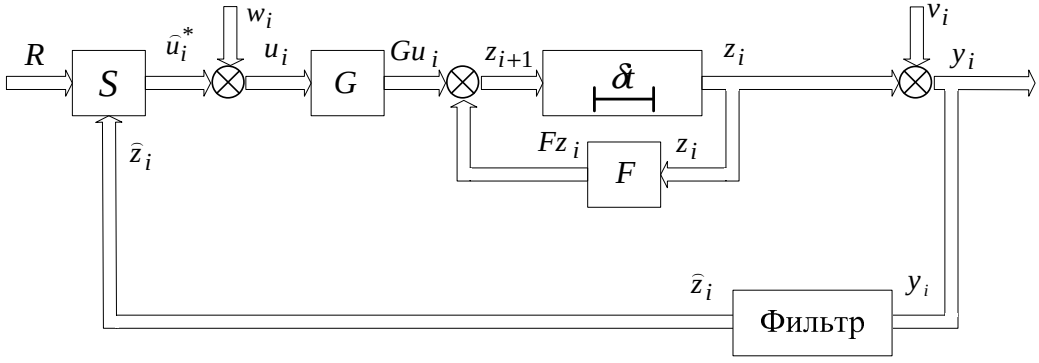


Рисунок 5.7. Структурная схема алгоритма синтеза управляющих воздействий с фильтром Калмана

Для снижения влияния шумов вместо y_i в алгоритм синтеза ОУ подставляется оценка вектора фазовых координат $\hat{z}_i$, в этом случае формула (5.16) принимает вид [153]

$$\hat{u}_i^* = S(\hat{z}_i, N, R), \tag{5.19}$$

где

$$\hat{z}_i = F\hat{z}_{i-1} + G\hat{u}_{i-1} + K_i(y_i - F\hat{z}_{i-1} - G\hat{u}_{i-1}).$$

Значения коэффициента усиления фильтра Калмана K_i вычисляются по следующим формулам [153]:

$$K_i = \frac{F^2 P_{i-1} + \sigma_w^2}{F^2 P_{i-1} + \sigma_w^2 + \sigma_v^2}, \quad P_i = \frac{RF^2 P_{i-1} + \sigma_w^2}{F^2 P_{i-1} + \sigma_w^2 + \sigma_v^2},$$

где P_i – дисперсии ошибок фильтрации.

Управление (5.19) легко рассчитывается простыми микропроцессорными устройствами в реальном режиме времени, затраты на разработку алгоритмического и программного обеспечения здесь минимальны.

Рассмотрим имитационное моделирование работы ИИУС ТТА в условиях помех. Целью моделирования является анализ функционирования ИИУС ТТА при различных шагах дискретизации времени и интенсивности помех (среднеквадратичного отклонения) в каналах управления σ_w и измерения σ_v.

Здесь наибольший интерес представляют три ситуации (см. работу автора [18]):

1) в каналах управления и измерения действуют дестабилизирующие факторы одинаковой интенсивности;

2) интенсивность дестабилизирующих факторов в одном из каналов на порядок больше чем в другом;

3) в одном из каналов отсутствуют дестабилизирующие факторы.

В качестве генератора дестабилизирующих факторов в каналах управления и измерения применялась следующая функция [51]

$$\Im(0,\sigma) = \sigma \sin(2\pi\aleph(0,1))\sqrt{2\sigma^2 \ln\left(\frac{1}{\aleph(0,1)}\right)}, \qquad (5.20)$$

где $\aleph(0,1)$ — случайная величина, имеющая равномерное распределение на интервале [0, 1], $\Im(0,\sigma)$ — нормально распределенная случайная величина с нулевым математическим ожиданием и заданным среднеквадратичным отклонением σ [18].

Когда используется функция (5.20) как генератор случайных возмущений, следует проверять равенство нулю математического ожидания величины (5.20). При этом значение расчетного среднеквадратичного отклонения должно соответствовать заданному, в виду того, что возможны отклонения параметров распределения случайной величины $\Im(0,\sigma)$. При отклонении от нулевого значения математического ожидания помехи в канале измерения возникает уже систематическая ошибка измерений [18].

Если в расчетах возникают отклонения параметров распределения (5.20) от требуемых значений, обычно применяется следующий метод. С целью

получения нулевого математического ожидания из всех сгенерированных по этой формуле значений вычитают их среднее значение [18]:

$$\eta_i = \varepsilon_i - \bar{\varepsilon}, \tag{5.21}$$

где ε — случайная величина, вычисляемая по формуле (5.20).

Среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{\Im - 1}\sum_{i=1}^{N}\eta_i^2} \tag{5.22}$$

приводят к заданному значению по формуле

$$\xi_i = \frac{\eta_i}{\sigma_R}\sigma. \tag{5.23}$$

Необходимое число помех получают при помощи генератора (5.20). В результате преобразований (5.21)–(5.23) значения случайной величины ξ_i являются белым (гауссовским) шумом [18]. В качестве результата одного эксперимента бралась усредненная выборка по 100 опытам, при каждом опыте значения функции (5.20), имитирующей шумы использовались в прямой и обратной последовательности.

Применение фильтра Калмана проиллюстрируем на примере. Пусть моделью динамики объекта служит стохастический инерционный объект первого порядка, где для удобства будем полагать аддитивность шума. При следующем ограничении на управление $\forall k_j \in [0, N-1]: u_{k_j} \in [u_{\text{н}} = -3; u_{\text{в}} = 3]$, за конечное число шагов $N\delta t = 20$ требуется перевести объект из начального состояния $z_0 = 10$ в конечную область $z_{20} \in [-0{,}1; 0{,}1]$, с минимумом затрат энергии [18].

Пусть на объект и применяемое устройство измерения действуют дестабилизирующие факторы с интенсивностями σ_{w_i} и σ_{v_i}. За конечное значение z_N при вычислении синтезирующей функции возьмем середину интервала, т.е. положим $z_N = 0$. Для выбора лучшего алгоритма управления (с фильтром Калмана или без него) значения функционалов энергосберегающего управления

на последнем шаге u_N рассчитываются удовлетворяющими следующему условию $Fz_N + Gu_N + w_N = 0$.

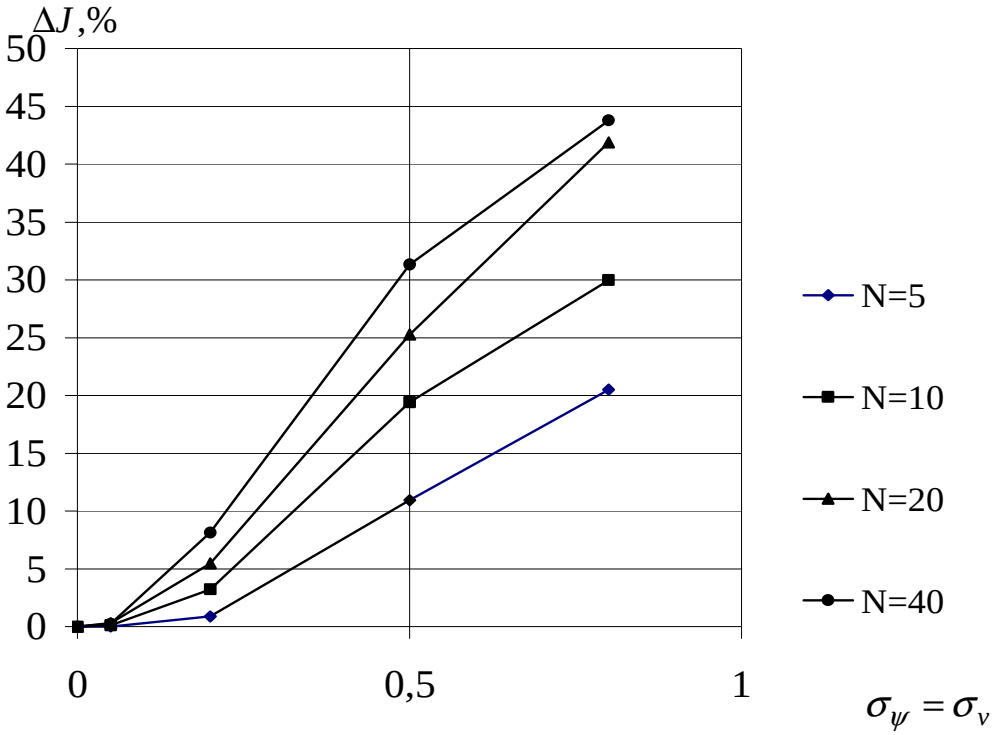


Рисунок 5.8. Зависимость энергозатрат от числа шагов (интенсивности дестабилизирующих факторов равны)

Таблица 5.5 Работа алгоритма при равных интенсивностях дестабилизирующих факторов

N	δt	σ_w	σ_v	J	J^{ϕ}	$\Delta J,\%$
5	4	0	0	7,40541	7,40541	0
		0,05	0,05	7,47694	7,47464	0,030761
		0,2	0,2	7,59557	7,52801	0,889466
		0,5	0,5	9,45879	8,42355	10,94474
		0,8	0,8	10,77637	8,56543	20,51656
10	2	0	0	7,21943	7,21943	0
		0,05	0,05	7,2444	7,23536	0,124786
		0,2	0,2	8,17852	7,91439	3,229557
		0,5	0,5	11,58292	9,33299	19,42455
		0,8	0,8	16,06588	11,252	29,96338
20	1	0	0	7,14798	7,14798	0
		0,05	0,05	7,44105	7,41843	0,303989
		0,2	0,2	9,35906	8,84811	5,459416
		0,5	0,5	17,43127	13,02637	25,2701
		0,8	0,8	33,43228	19,4339	41,87085
40	0,5	0	0	7,1269	7,1269	0
		0,05	0,05	7,41989	7,40137	0,249599
		0,2	0,2	10,60044	9,73801	8,135794
		0,5	0,5	29,06011	19,95556	31,33006
		0,8	0,8	60,63058	34,07669	43,7962

В таблице 5.5 (см. работу автора [18]) приводятся различные значения количества шагов, значения шага дискретизации, интенсивностей дестабилизирующих факторов в каналах управления σ_w и измерения σ_v, минимизируемого функционала затрат энергии при управлении без фильтрации J и с фильтрацией $J^{\text{ф}}$, экономии энергии (в процентах), вычисляемой следующим образом:

$$\Delta J = 100 - 100 \cdot \frac{J^{\text{ф}}}{J}.$$

Таблица 5.6. Работа алгоритма, когда интенсивность одного дестабилизирующего фактора на порядок выше другого

N	δt	σ_w	σ_v	J	$J^{\text{ф}}$	$\Delta J,\%$
5	4	0,05	0,5	8,13644	7,41026	8,925034
		0,5	0,05	7,29886	7,29668	0,029868
10	2	0,05	0,5	10,11854	7,22857	28,56114
		0,5	0,05	9,53909	9,52294	0,169303
20	1	0,05	0,5	12,80227	7,16049	44,06859
		0,5	0,05	13,3726	13,34786	0,185005
40	0,5	0,05	0,5	15,99472	7,16921	55,17765
		0,5	0,05	18,09749	17,99439	0,569692

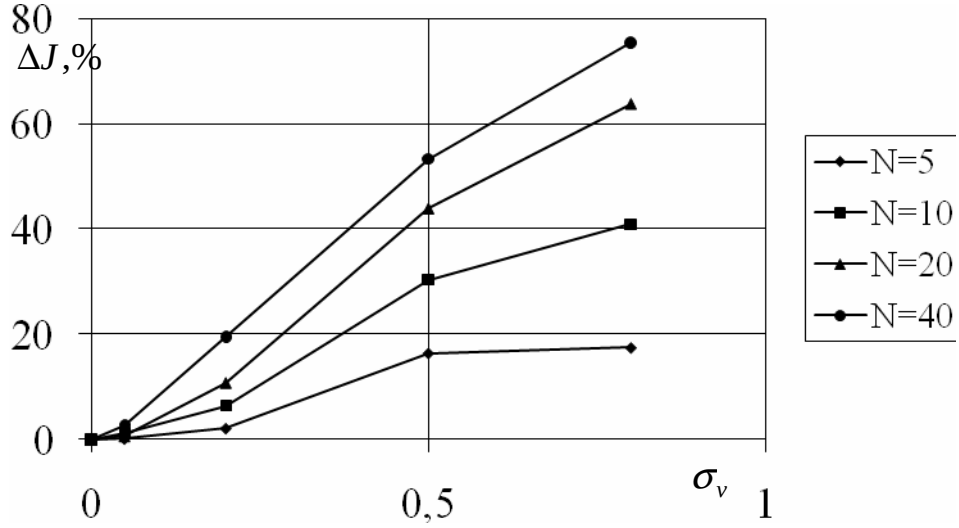


Рисунок 5.9. График зависимости экономии энергоресурсов от числа шагов и интенсивности дестабилизирующих факторов в канале измерения

Таблица 5.7. Работа алгоритма при отсутствии дестабилизирующих факторов в канале управления

N	δt	σ_w	σ_v	J	J^{ϕ}	$\Delta J,\%$
5	4	0	0	7,40541	7,40541	0
		0	0,05	7,40492	7,39194	0,175289
		0	0,2	7,57854	7,41459	2,163345
		0	0,5	8,78138	7,33752	16,44229
		0	0,8	9,00244	7,42847	17,48382
10	2	0	0	7,21943	7,21943	0
		0	0,05	7,22585	7,13735	1,224769
		0	0,2	7,72025	7,22719	6,386581
		0	0,5	10,41977	7,26409	30,28551
		0	0,8	12,38129	7,32211	40,86149
20	1	0	0	7,14798	7,14798	0
		0	0,05	7,20125	7,15089	0,699323
		0	0,2	8,02443	7,15539	10,82993
		0	0,5	12,7985	7,18154	43,88764
		0	0,8	19,68237	7,1419	63,71423
40	0,5	0	0	7,1269	7,1269	0
		0	0,05	7,32659	7,12517	2,749164
		0	0,2	8,86014	7,13479	19,47317
		0	0,5	15,22112	7,10981	53,28984
		0	0,8	29,34844	7,23294	75,35494

Анализ данных таблицы 5.5 и рисунка 5.8 приводит к выводу о том, что при увеличении интенсивности дестабилизирующих факторов и увеличении числа шагов происходит увеличение экономии энергии при использовании алгоритма синтеза управляющих воздействий с фильтром Калмана.

В таблице 5.7 отражена ситуация, когда присутствуют дестабилизирующие факторы только в канале измерения. Из нее и рисунка 5.9 видно, что при увеличении интенсивности дестабилизирующих факторов, действующих по каналу измерения эффект фильтрации существеннее, чем в первом случае [18].

При отсутствии дестабилизирующих факторов в канале измерения, таким образом, нецелесообразно использовать фильтр Калмана в виду того, что коэффициент усиления равен единице.

На основе проведенных имитационных исследований (см. [18]) можно сделать следующие выводы. При значительной интенсивности дестабилизирующих факторов по каналу управления и по каналу измерения применение фильтра Калмана позволяет снизить затраты энергии, при том уменьшение временного шага дискретизации дает увеличение эффекта энергосбережения. При малой интенсивности дестабилизирующих факторов по каналу измерения применение фильтрации не дает снижения энергозатрат при любом шаге дискретизации времени.

С целью получения наилучшего эффекта использования фильтра Калмана требуется максимально компенсировать дестабилизирующие факторы, действующие по каналу управления и уменьшить шаг временной дискретизации [18].

5.2.4 Метод настройки адаптивного регулятора с применением нечеткой логики

Сформулируем задачу оптимального управления (ЗОУ) для объекта, описываемого системой дифференциальных уравнений вида (2.8). Пусть за фиксированный временной интервал $\Delta t = t_к - t_0$ исследуемый объект необходимо перевести из начального состояния $x^0 = \left(x_1^0, x_2^0, ..., x_n^0\right)^T$ в конечную область $\chi^к = \left([x_1^{кн}, x_1^{кв}], [x_2^{кн}, x_2^{кв}], ..., [x_n^{кн}, x_n^{кв}]\right)$, пусть имеется ограничение на управление $u \in [u_н, u_в]$, при этом минимизируется функционал (1.1). Массив реквизитов ЗОУ имеет вид $\Re = (A,\ B, u_н,\ u_в,\ x^0, \chi^к,\ t_0,\ t_к)$.

Широко известны следующие две стратегии оптимального управления: программная (pr) и позиционная (pz). Для выхода на заданный режим в программной стратегии необходимо точно задать все параметры модели. В позиционной стратегии используется обратная связь, которая дает возможность

достичь заданный режим, но затраты энергоресурсов при этом могут резко увеличиться.

При работе конкретного объекта в реальности, его параметры могут иметь некоторую неопределенность. Например, влиять на параметры может неточное задание некоторых элементов массива исходных данных задачи управления или изменение режима работы самого объекта. Любое состояние объекта однозначно задается вектором $\Lambda = (L_1(R), L_2(R))$ синтезирующих переменных $L_1(R)$, $L_2(R)$ [24].

В реальности траектория изменения вектора синтезирующих переменных может отклоняться от расчетной за счет наличия дестабилизирующих факторов или случайных изменений параметров объекта. При изменении параметров объекта происходит отклонение вектора синтезирующих переменных от рассчитанного по программной стратегии. Это отклонение обозначим $\Delta\Lambda = \left|\Lambda_{pr} - \Lambda_{pz}\right|$. Критерий $\Delta\Lambda$ используется для определения степени рассогласованности значений векторов синтезирующих переменных, выбранных стратегий управления, так по значению Λ_{pr} можно сделать вывод о возможности решения задачи управления, а по Λ_{pz} определяется наиболее подходящий вид синтезирующей функции управления на каждом шаге. Учет изменения параметров объекта в процессе управления традиционно осуществляется проведением на каждом шаге управления параметрической идентификации. Это не является эффективным, поэтому лучше использовать подход, предлагаемый в настоящей работе (см. работу автора [24]).

С этой целью целесообразнее использовать стратегию $S_{\text{кор}}$ корректируемого управления, в которой, используя весовые коэффициенты, выбирается сочетание оптимальных стратегий по формуле

$$u_k^{*}{}_{ad}(t) = c u_k{}^{pz}(t) + (1-c) u_k{}^{pr}(t), \qquad (5.24)$$

где $u_k^{*}{}_{ad}(t)$ – адаптивное, $u_k{}^{pz}(t)$ – позиционное, $u_k{}^{pr}(t)$ – программное управление, c – весовой коэффициент, подбираемый в течение интервала

управления с использованием теории нечетких множеств в зависимости от отклонения $\Delta\Lambda$ [24].

Введем нечеткую переменную $\tilde{\lambda}$, определяющую значения $\Delta\Lambda$, для которой сформулируем продукционные правила в следующем виде [24]:

$\tilde{\lambda}_1$: если $\Delta\Lambda$ – большое, то стратегия – позиционная $(c=1)$;

$\tilde{\lambda}_2$: если $\Delta\Lambda$ – среднее, то стратегия – корректируемая (5.25)

(c определяется с помощью продукционных правил fuzzy logic);

$\tilde{\lambda}_3$: если $\Delta\Lambda$ – малое, то стратегия – программная $(c=0)$.

Для реализации описанного подхода создана информационная технология [24], которая позволяет проводить имитационное моделирование работы систем с использованием описанных выше стратегий.

В качестве примера рассмотрим объект, описываемый дифференциальным уравнением первого порядка. Массив реквизитов, решаемой ЗОУ имеет вид

$$R=(a=-0{,}1;\ b=0{,}2;\ u_н=-3;\ u_в=3;\ t_0=0;\ t_к=20;\ \delta t=1;\ x_0=10;\ \chi^к=[-0{,}5;\ 0{,}5]),$$

где δt – временной шаг дискретизации.

Будем считать, что наибольшее влияние на изменение $\Delta\Lambda$ оказывает изменение параметра модели a (при $b=const$). На рис. 5.10 приведен пример настройки адаптивного регулятора. В этом примере задается словарь значений нечеткой переменной $\tilde{\lambda}$, и далее в результате расчетов по формуле (5.24) (принято значение $c=0{,}5$) вычисляется критерий $\Delta\Lambda$, по которому следует, изменяя коэффициент c, проводить корректировку адаптивной стратегии. В рассматриваемом примере на 10-м шаге вычисляется $\Delta\Lambda_{pr}$ – "Центр" (см. рис. 5.10), определяется “величина нечеткости” слева и справа, затем строится график функций принадлежности нечетких переменных по правилам (5.25), используя который с помощью метода лингвистической аппроксимации находится значение коэффициента c. Далее, начиная с десятого шага, управляющие воздействия синтезируются с новым значением c по формуле (5.24).

Результаты моделирования приведены в табл. 5.8, где a_p – реальное значение параметра a при отклонении $\Delta\Lambda$. Функционалы энергозатрат: $J_э^{ПрМ}$ –

при программной стратегии с $a = a_p$, $J_э^{Пр}$ – при программной стратегии с a полученным при идентификации модели, $J_э^{Пз}$ – при позиционной стратегии, $J_э^{Ад}$ – при адаптивной стратегии, $x_к^{Пр}$ $x_к^{Пз}$ $x_к^{Ад}$ – конечные значения вектора фазовых координат при программной, позиционной и адаптивной стратегиях управления соответственно.

Таблица 5.8. Результаты моделирования

a_p	$\Delta\Lambda$	c	$J_э^{ПрМ}$	$J_э^{Пр}$	$J_э^{Пз}$	$J_э^{Ад}$	$x_к^{Пр}$	$x_к^{Пз}$	$x_к^{Ад}$
-0,04	0,334	1	53,668	10,327	52,752	52,844	2,735	0,396	0,437
-0,046	0,294	0,88	46,207	10,327	46,691	42,270	2,287	0,244	0,438
-0,052	0,256	0,77	39,633	10,327	40,664	34,097	1,892	0,138	0,421
-0,058	0,208	0,62	33,873	10,327	34,743	25,956	1,546	0,073	0,465
-0,064	0,176	0,53	28,850	10,327	29,423	21,635	1,242	0,030	0,399
-0,07	0,145	0,43	24,490	10,327	23,912	17,514	0,976	0,033	0,365
-0,076	0,117	0,35	20,723	10,327	19,648	14,938	0,742	0,028	0,292
-0,082	0,09	0,27	17,484	10,327	16,177	12,812	0,538	0,023	0,225
-0,088	0,047	0,14	14,708	10,327	13,349	10,978	0,359	0,019	0,169
-0,094	0,024	0,07	12,340	10,327	11,042	10,284	0,203	0,016	0,065
-0,1	0	0	10,327	10,327	9,157	10,149	0,067	0,013	-0,057
Критерии оценки, %			Эталон	100%	80%	100%	30%	100%	100%

Используя результаты моделирования, найдем количество экспериментов, отвечающих требованиям точности выхода на заданный режим Q_m, и достижения минимума функционала “затраты энергии” $Q_э$ (в процентах от общего количества). Для оценки эффективности применяемой стратегии при равнозначности значений функционалов Q_m и $Q_э$ применим совокупный критерий [24]

$$Q = \frac{Q_т + Q_э}{2}.$$

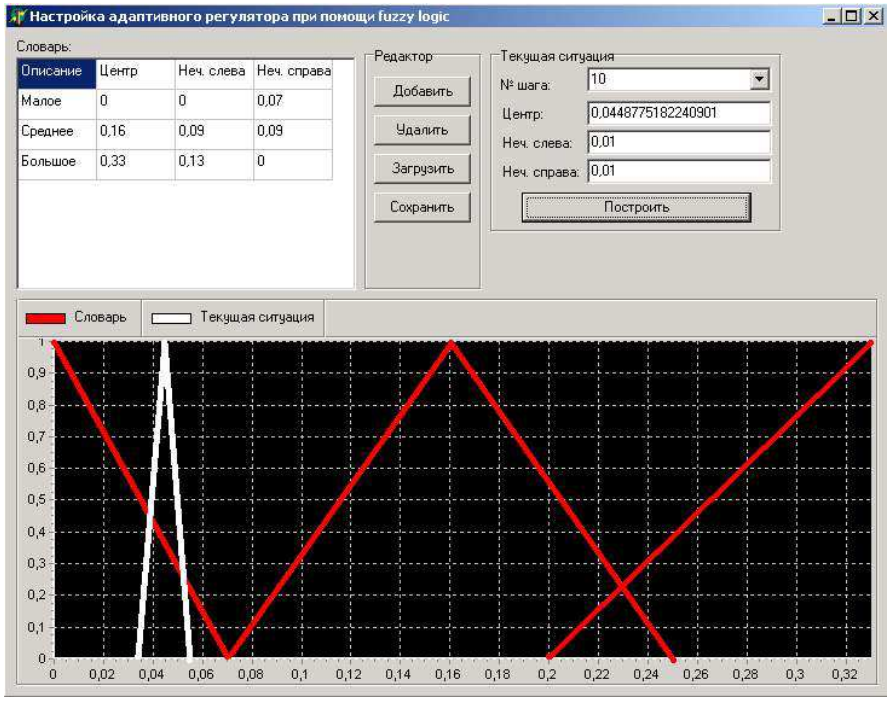


Рисунок 5.10. Пример настройки адаптивного регулятора

Таблица 5.9. Совокупный критерий при различных стратегиях управления

Стратегия	Q, %
Программная	65
Позиционная	90
Адаптивная (fuzzy logic)	100

Если функционалы неравнозначны, то следует ввести весовые коэффициенты. При сравнении полученных результатов (см. табл. 5.9) напрашивается вывод, что применение адаптивной стратегии (fuzzy logic) более предпочтительно [24].

Назовем управление с адаптивной стратегией в случае, когда оператор синтеза не меняет вид (вектор синтезирующих переменных принадлежит одной зоне), *алгоритмом с мягкой коррекцией*. Если вектор синтезирующих переменных пересекает границы зон, то происходит изменение оператора синтеза. Такой алгоритм будем называть *алгоритмом жесткой к*оррекции [30].

Алгоритмы мягкой и жесткой коррекции энергосберегающего управления динамическими объектами используются при наличии ДФ. Применение этих алгоритмов позволяет увеличить два важных показателя – точность выхода на заданный режим и энергосбережение на 15-20% по сравнению с традиционными алгоритмами управления.

Рассмотренные алгоритмы и методы использовались при синтезе оптимального управления объектами, описываемыми моделями первого порядка. Проведенные исследования показали, что эффект энергосбережения и точность достижения цели управления сильно зависят от характеристик возмущающих воздействий в каналах управления и измерения. Применение рассмотренных алгоритмов позволяют повысить эффект энергосбережения на 10-15% и значительно увеличить вероятность достижения цели управления.

5.3 Комбинированный алгоритм управления процессом нагрева многокамерного тепло-технологического аппарата

При энерго- и ресурсосберегающем управлении процессами нагрева многокамерными тепло-технологическими аппаратами следует учитывать взаимное влияние соседних камер. Предлагается использовать комбинированный алгоритм [180], основанный на применении принципа максимума Понтрягина и использовании динамического программирования и синтезирующих переменных, введенных Ю.Л.Муромцевым (см. например [184]). Комбинированный алгоритм позволяет получать множество программ управления, при которых минимизируется заданный функционал сразу по всем камерам.

Задачу ресурсосберегающего управления можно сформулировать в следующем виде. Пусть, описываемый моделью (3.30) объект, необходимо перевести из начального состояния в конечное:

$$z_i\left(t_i^0\right) = z_i^0 \rightarrow z_i\left(t_i^{\text{к}}\right) = z_i^{\text{к}}, \tag{5.26}$$

имея в любой момент времени ограничения на управляющее воздействие

$$\forall t \in [t_i^0, t_i^{\text{к}}]: u_i(t) \in [u_{\text{н}}, u_{\text{в}}], \tag{5.27}$$

и минимумом функционала

$$J_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} J_i = \sum_{i=1}^{n} \int_{t_i^{\text{к}}}^{t_i^0} \left| u_i(t) \right| dt \rightarrow \min. \tag{5.28}$$

При этом необходимо обеспечить выполнение условия

$$t_1^{\text{к}} = t_2^{\text{к}} = \ldots = t_n^{\text{к}}. \tag{5.29}$$

При решении задачи (5.26)–(5.29) будем использовать (см. [84]) комбинированный алгоритм, состоящий из следующих этапов:

1) Используя результаты анализа управляющих воздействий, рассчитываются управляющие программы для каждой камеры ТТА

$$u_i^*(t) = \begin{cases} \gamma_1, & t \in [t_i^0, t_i^1), \\ \gamma_2, & t \in [t_i^1, t_i^2), \\ \gamma_3, & t \in [t_i^2, t_i^{\text{к}}], \end{cases} \; i = \overline{1,n},$$

где $\gamma_1,\ \gamma_2,\ \gamma_3 \in [u_{\text{н}}, u_{\text{в}}],\ t_i^1,\ t_i^2$ – времена переключения, при этом варьируемые переменные здесь $t_i^{\text{к}}$.

2) По имеющимся экспериментальным данным находится максимальное время разогрева

$$t_{\max}^{\text{к}} = \max\{t_i^{\text{к}}\},\ i = \overline{1,n}.$$

3) Для каждой камеры рассчитывается время начала разогрева относительно $t_{\max}^{\text{к}}$:

$$t_i^0 = t_{\max}^{\text{к}} - t_i^{\text{к}}.$$

4) Таким образом, множество программ $\{u_1^*(\bullet), u_2^*(\bullet), ..., u_n^*(\bullet)\}$, применяемых для полученных временных интервалов $[t_i^0,\ t_{\max}^{\text{к}}]$, минимизирует функционал J_Σ совместно для всех камер и дает выполнение условия (5.29).

Результат работы этого алгоритма приведен в разделе 7.

5.4 Алгоритмы решения задач управления в режиме «Процесс»

На этапе алгоритмизации при построении ИИУС ТТА на основе показаний интеллектуального датчика влажности в контролируемых камерах в режиме «Процесс» обеспечивается идентификация текущего состояния функционирования системы. На основании имеющейся информации о влажности материала определяется, какая из задач управления будет решаться. При классификации ситуаций учитываются как диапазоны возможных изменений

влажности материала в контролируемых камерах, так и погрешности реальных датчиков, а также другие факторы неопределенности. В алгоритмах, применяемых в режиме «Процесс», интеллектуализация синтеза управляющих воздействий базируется на основе метода выбора параметров режима, использующего числовые оценки мер доверия и нечеткого вывода по продукционным правилам (см. работу автора [209]).

Основным этапом создания алгоритмического обеспечения ИИУС ТТА процесса сушки является определение лингвистических переменных [209]. В качестве входных рассматриваются: Φ_n – «влажность пастообразного материала на выходе n-ой камеры», Φ_{n+1} – «влажность пастообразного материала на выходе $(n+1)$-ой камеры» и $\mathrm{M}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{к}}$ – оценки меры доверия достижения требуемой влажности исследуемого пастообразного материала на выходе ТТА [209]. Определяемой выходной переменной является $U^{\text{сл}}$ – требуемое значение, на которое следует изменить скорость движения ленты, см. [209]. Условимся обозначать термы входных переменных следующим образом

$$\Phi_n, \Phi_{n+1} = \{\text{ННД}, \text{НД}, \text{Д}, \text{ВД}, \text{НВД}\}; \quad \mathrm{M}_{\mathrm{k}}^{\mathrm{к}} = \{\mathrm{M}, \mathrm{CP}, \mathrm{B}\}$$

(см. таблицы 5.10 – 5.12) [209].

Таблица 5.10. Влажность материала на выходе n камеры

№ терма	Условные обозначения термов переменной Φ_{n}	Функции принадлежности термов
1	ННД	1/0+1/17,5+0/22,5
2	НД	0/17,5+1/22,5+1/27,5+0/32,5
3	Д	0/27,5+1/32,5+1/37,5+0/42,5
4	ВД	0/37,5+1/42,5+1/47,5+0/52,5
5	НВД	0/47,5+1/52,5+1/100

Здесь (см. [209]) ННД – влажность материала, много ниже допустимой, НД – влажность, чуть ниже допустимой; Д – допустимая влажность материала; ВД – влажность материала, выше допустимой; НВД – влажность материала, много выше допустимой (см. рис. 5.12).

Таблица 5.11. Влажность материала на выходе $n+1$ камеры

№ терма	Условные обозначения термов переменной Φ_{n+1}	Функции принадлежности термов
1	ННД	1/0+1/5+0/7
2	НД	0/5+1/7+1/9+0/11
3	Д	0/9+1/11+1/13+0/15
4	ВД	0/13+1/15+1/17+0/19
5	НВД	0/17+1/19+1/100

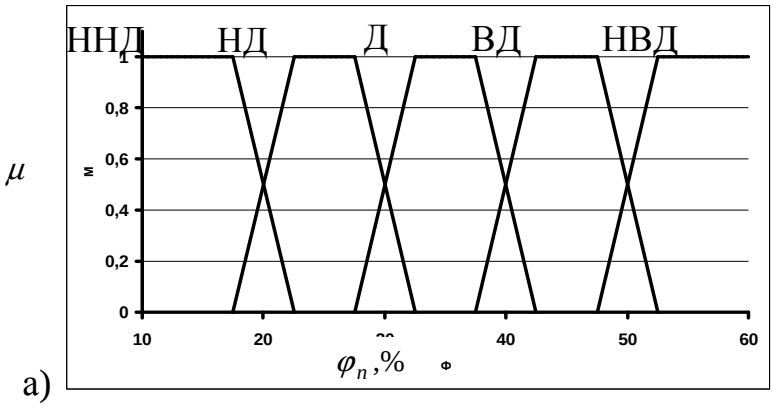
Таблица 5.12. Мера доверия к влажности материала на выходе сушилки

№ терма	Условные обозначения термов переменной $M_к^к$	Функции принадлежности термов
1	Н	1/0+1/0,575+0/0,675
2	СР	0/0,575+1/0,675+1/0,725+0/0,825
3	В	0/0,725+1/0,825+1/1

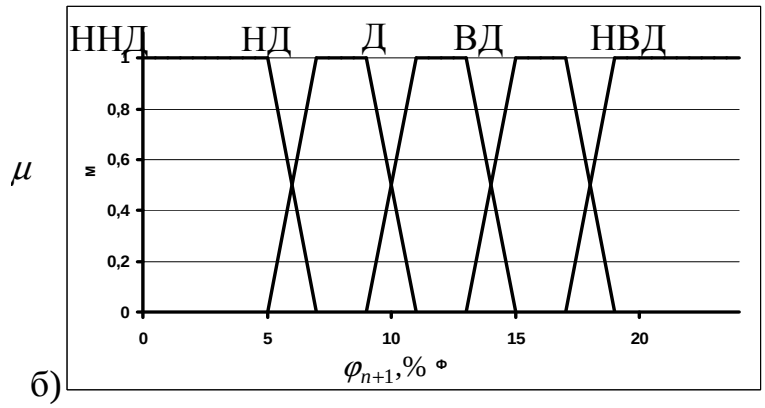
В таблице 5.13 представлены функции принадлежности выходной переменной $U^{сл}$, принимающей одно из пяти значений: СПОВ – значение, на которое требуется сильно повысить скорость движения ленты; ПОВ – значение, на которое необходимо повысить скорость движения ленты; О – скорость движения ленты оставить неизменной; ПОН – значение, на которое требуется понизить скорость движения ленты; СПОН – значение, на которое необходимо сильно понизить скорость движения ленты, т.е. $U^{сл} = \{СПОН, ПОН, О, ПОВ, СПОВ\}$ [209]. Функции принадлежности термов лингвистических переменных приведены на рис. 5.12 (а-г) [209].

Таблица 5.13. Изменение скорости движения ленты

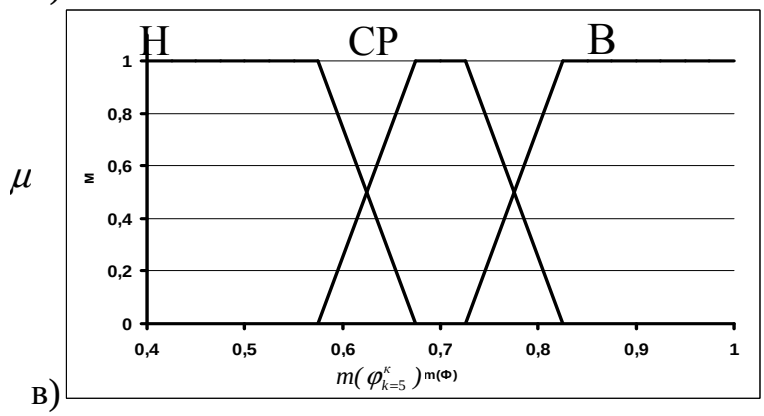
№ терма	Условные обозначения термов переменной $U^{сл}$	Функции принадлежности термов
1	СПОН	1/-0,3+1/-0,2+0/-0,17
2	ПОН	0/-0,2+1/-0,17+1/-0,07+0/-0,04
3	О	0/-0,07+1/-0,04+1/0,04+0/0,07
4	ПОВ	0/0,04+1/0,07+1/0,17+0/0,2
5	СПОВ	0/0,17+1/0,2+1/0,3



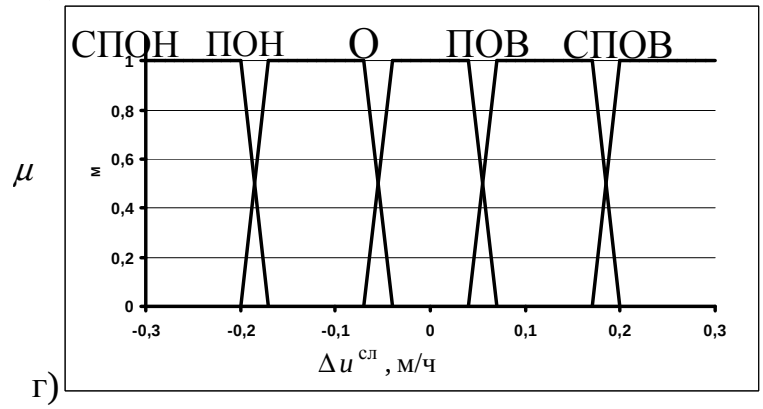
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.12. Функции принадлежности термов лингвистической переменной:

а) Φ_n (влажность пастообразного материала на выходе n камеры);

б) Φ_{n+1} (влажность пастообразного материала на выходе $n+1$ камеры);

в) $M_k^к$ (мера доверия к достижению требуемой влажности материала на выходе ТТА);

г) $\Delta U^{сл}$ (значение, на которое необходимо изменить скорость движения ленты).

Возможные алгоритмы управления, представляющие собой системы продукционных правил, определяются, учитывая множество $\mathcal{H}$ изменения траекторий (см. таблицы 4.1, 4.2, раздела 4), выбранные классы возможных ситуаций $K_{\text{пр}}$, $K_{\text{п}}$, $K_{\text{п+1}}$, $K_{\text{п,п+1}}$ и вышеописанные лингвистические переменные. Приведем алгоритмы синтеза управляющих воздействий при работе ИИУС ТТА в режиме «Процесс».

В момент времени t для расчета управляющих воздействий используется следующая информация. Значения влажности материала в n-ой и $(n+1)$-ой камерах, определенные с использованием интеллектуального датчика влажности пастообразного материала по аналитическим моделям

$$\overline{\varphi_n} = \left[1+\exp\left(-\beta_{\text{вых}}^{(n)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_n} w_j^{(n\ \text{вых})} \cdot \left(1+\exp\left(-\beta_j^{(n)} \cdot \left[w_{1,j}^{(n)} \cdot \overline{\varphi_o^{н}} + w_{2,j}^{(n)} \cdot \overline{x_o^{\text{тов}}} + w_{3,j}^{(n)} \cdot \overline{x_o^{\text{вов}}} + w_{4,j}^{(n)} \cdot \overline{u_o^{\text{сл}}} + w_{5,j}^{(n)} \cdot \overline{x_n^{\text{тса}}} + w_{6,j}^{(n)} \cdot \overline{x_n^{\text{вса}}} + w_{7,j}^{(n)} \cdot \overline{u_o^{\text{вв}}} + w_{8,j}^{(n)} \cdot \overline{x_o^{\text{вор}}} + w_{9,j}^{(n)} \cdot \overline{u_n^{\text{взо}}} + w_{10,j}^{(n)} \cdot \overline{u_n^{\text{сш}}}\right] - \theta_j^{(n)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{вых}}^{(n)}\right)\right]^{-1}; \quad (5.30)$$

$$\overline{\varphi_{n+1}} = \left[1+\exp\left(-\beta_{\text{вых}}^{(n+1)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_{n+1}} w_j^{(n+1\ \text{вых})} \cdot \left(1+\exp\left(-\beta_j^{(n+1)} \cdot \left[w_{1,j}^{(n+1)} \cdot \overline{\varphi_n} + w_{2,j}^{(n+1)} \cdot \overline{x_o^{\text{тов}}} + w_{3,j}^{(n+1)} \cdot \overline{x_o^{\text{вов}}} + w_{4,j}^{(n+1)} \cdot \overline{u_o^{\text{сл}}} + w_{5,j}^{(n+1)} \cdot \overline{x_{n+1}^{\text{тса}}} + w_{6,j}^{(n+1)} \cdot \overline{x_{n+1}^{\text{вса}}} + w_{7,j}^{(n+1)} \cdot \overline{u_o^{\text{вв}}} + w_{8,j}^{(n+1)} \cdot \overline{u_{n+1}^{\text{взо}}} + w_{9,j}^{(n+1)} \cdot \overline{u_{n+1}^{\text{сш}}}\right] - \theta_j^{(n+1)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{вых}}^{(n+1)}\right)\right]^{-1}, \quad (5.30)$$

где для сигмоидальных активационных функций нейронов обозначены через $\beta_j^{(n)}$, $\beta_j^{(n+1)}$ – углы наклона скрытого слоя, а $\beta_{\text{вых}}^{(n)}$, $\beta_{\text{вых}}^{(n+1)}$ – выходного слоя нейронной сети, $\theta_j^{(n)}$, $\theta_j^{(n+1)}$ – сдвиги скрытого и $\theta_{\text{вых}}^{(n)}$, $\theta_{\text{вых}}^{(n+1)}$ – выходного слоев нейронной сети; $w_{i,j}^{(n)}$, $w_{i,j}^{(n+1)}$ и $w_j^{(n\ \text{вых})}$, $w_j^{(n+1\ \text{вых})}$ – весовые коэффициенты связей скрытого и выходного слоев нейронной сети для n-ой и $(n+1)$-ой камер соответственно; через N_n – число нейронов в скрытом слое сети в n-ой камере сушильной установки, N_{n+1} – число нейронов в скрытом слое сети в $(n+1)$-ой камере сушильной установки; $\overline{\varphi_o^{н}}$, $\overline{\varphi_n}$, $\overline{\varphi_{n+1}}$ – нормализованные значения начальной влажности материала и влажности в n-ой и $(n+1)$-ой камерах соответственно;

$\overline{u_o^{\text{вв}}}$ – нормализованное значение управления работой вытяжного вентилятора; $\overline{u_o^{\text{сл}}}$ – нормализованное значение управления скоростью движения ленты, $\overline{x_o^{\text{вор}}}$ – нормализованное значение показателя наличия (отсутствия) ворошителя; $\overline{x_o^{\text{тов}}}$, $\overline{x_o^{\text{вов}}}$ – нормализованные значения температуры и влажности окружающего воздуха; при этом индекс o обозначает влияние факторов, этим индексом обозначенных, на все камеры сушильной установки; $\overline{u_n^{\text{взо}}}$, $\overline{u_n^{сш}}$, $\overline{u_{n+1}^{\text{взо}}}$, $\overline{u_{n+1}^{сш}}$ – нормализованные значения управления воздухозаборными окнами и сбросными шиберами; $\overline{x_n^{\text{тса}}}$, $\overline{x_n^{\text{вса}}}$, $\overline{x_{n+1}^{\text{тса}}}$, $\overline{x_{n+1}^{\text{вса}}}$ – нормализованные значения температуры и влажности сушильного агента в n-ой и $(n+1)$-ой камерах, соответственно. Значения влажности материала φ_n и φ_{n+1} в контролируемых n-ой и $(n+1)$-ой камерах получают, денормализовав значения $\overline{\varphi_n}$ и $\overline{\varphi_{n+1}}$.

Мера доверия к требуемой влажности пастообразного материала на выходе $m(\varphi_k^{\text{к}})$ рассчитывается по процедурной модели (3.56).

При этом на предыдущем шаге определяются значения компонент вектора управляющих воздействий $u(t-\Delta t)$ [209].

Помимо этого, в памяти управляющего устройства необходима информация о множестве всех возможных ситуаций, их классах, множестве продукционных правил, функциях принадлежности лингвистических переменных.

Сначала идентифицируется подмножество ситуаций на основе ранее полученной информации (см. работу автора [15])

$$H = \{h_n(\cdot) = (\varphi_n^{(n)},\ m^{(n)}(\varphi_k^{\text{к}})),\ h_{n+1}(\cdot) = (\varphi_n^{(n+1)},\ \varphi_{n+1}^{(n+1)},\ m^{(n+1)}(\varphi_k^{\text{к}})),$$

$$h_{n+2}(\cdot) = (\varphi_n^{(n+2)},\ \varphi_n^{(n+2)},\ m^{(n+2)}(\varphi_k^{\text{к}}))\},$$

где верхний индекс указывает принадлежность данной партии материала той или иной камере.

Затем идентифицируется класс ситуаций, соответствующий алгоритму управления. При этом, если все элементы множества H принадлежат классу $K_{\text{о}}$, то сохраняется режим работы с выбранным на предыдущем шаге управлением $u(t-\Delta t)$.

Если же каждый элемент множества H принадлежит классу $K_{\text{пр}}$, то в этом случае следует решить задачу повышения производительности ТТА при ограничении на качество конечного материала.

Когда компонент $h_n(\cdot)$ множества H принадлежит классу K_{n}, решается задача управления режимом только для n-ой камеры.

В том случае, когда компонент $h_{n+1}(\cdot) \in K_{n+1}$, необходимо решить задачу управления режимом для $(n+1)$-ой камеры.

При выполнении условия (4.42), когда ситуация принадлежит классу $K_{\text{n,n+1}}$, решаются задачи управления режимами одновременно для двух камер (см. [15]).

При решении задачи повышения производительности ТТА при ограничении на качество конечной продукции (2.1)–(2.5), (3.32)–(3.34) для класса ситуаций $K_{\text{пр}}$ применяется следующий алгоритм синтеза управляющего воздействия (см. [15, 209]).

I. Производится фаззификация входных лингвистических переменных – влажностей материала в n-ой и $(n+1)$-ой камерах Φ_n, Φ_{n+1} и меры доверия $\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$ к достижению требуемой влажности на выходе ТТА, в частности определяются значения функций принадлежности термов указанных лингвистических переменных.

II. Производится нечеткий вывод с использованием следующих продукционных правил, составленных на основе таблиц 5.10–5.12:

Правило 1: IF «Φ_n=ННД» and «Φ_{n+1}=ННД» and «$\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$=СР», then «$U^{\text{сл}}$=СПОВ»;

Правило 2: IF «Φ_n=ННД» and «Φ_{n+1}=НД» and «$\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$=СР», then «$U^{\text{сл}}$=СПОВ»;

Правило 3: IF «Φ_n = НД» and «Φ_{n+1} = ННД» and «$\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = СР», then «$U^{\text{сл}}$ = СПОВ»;

Правило 4: IF «Φ_2 = НД» and «Φ_3 = НД» and «$\text{М}_5^{\text{к}}$ = СР», then «$U^{\text{сл}}$ = СПОВ»;

Правило 5: IF «Φ_n = ННД» and «Φ_{n+1} = ННД» and «$\text{М}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = В», then «$U^{\text{сл}}$ = СПОВ»;

Правило 6: IF «Φ_n = ННД» and «Φ_{n+1} = НД» and «$\text{М}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = В», then «$U^{\text{сл}}$ = СПОВ»;

Правило 7: IF «Φ_n = НД» and «Φ_{n+1} = ННД» and «$\text{М}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = В», then «$U^{\text{сл}}$ = СПОВ»;

Правило 8: IF «Φ_n = НД» and «Φ_{n+1} = НД» and «$\text{М}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = В», then «$U^{\text{сл}}$ = СПОВ».

III. Производится так называемая аккумуляция, а именно полученные нечеткие множества для термов выходной лингвистической переменной объединяются в одно нечеткое множество.

IV. Производится преобразование (дефаззификация) выходной лингвистической переменной в численные значения изменения скорости движения ленты с использованием трех различных методов (метод центра тяжести; метод медианы; метод первого максимума), в результате получается множество значений управляющих воздействий $\{\Delta u_1^{\text{сл}}, \Delta u_2^{\text{сл}}, \Delta u_3^{\text{сл}}\}$.

V. Формируется интервал допустимого изменения управляющих воздействий $U_{\text{доп}}^{\text{сл}}$ на основе полученных значений. Для данного интервала рассчитывается оптимальное значение $(\Delta u_o^{сл})^*$, при котором функционал

$$J = c_1(a_0 + a_1\tilde{u}_o^{\text{сл}}) + c_2(b_0 + b_1(\tilde{u}_o^{\text{сл}})^2) \to \min_{u_o^{\text{сл}} \in u_{\text{доп}}^{\text{сл}}}, \qquad (5.32)$$

и учитывает потери от снижения качества конечной продукции и производительности ТТА.

При попадании ситуации в класс K_{n}, также решается задача оптимизации режимов сушки (3.35)–(3.41). Порядок решения следующий (см. [15]).

I. Производится фаззификация входной переменной $\Phi_{\text{n}}^{\text{к}}$, задающей влажность материала в *n*-ой камере по модели (5.30).

II. Производится нечеткий вывод по следующим продукционным правилам:

Правило 1: IF «$\Phi_{\text{n}}^{\text{к}}$ = ВД», then «$U^{\text{сл}}$ = ПОН»;

Правило 2: IF «$\Phi_{\text{n}}^{\text{к}}$ = НВД», then «$U^{\text{сл}}$ = СПОН».

Последующие шаги аналогичны шагам III, IV, V вышеописанного алгоритма.

В случае принадлежности ситуации классу $K_{\text{n+1}}$, решаем задачу (3.43)–(3.50). Здесь по моделям (5.31) и (3.56) производится фаззификация лингвистических переменных Φ_{n+1}, $\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$, соответственно, и определяются значения функций принадлежности термов этих переменных.

Затем для нечеткого вывода используются следующие продукционные правила:

Правило 1: IF «Φ_{n+1} = ВД» and «$\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = М», then «$U^{\text{сл}}$ = ПОН»;

Правило 2: IF «Φ_{n+1} = НВД» and «$\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = М», then «$U^{\text{сл}}$ = СПОН»;

Правило 3: IF «Φ_{n+1} = ВД» and «$\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = СР», then «$U^{\text{сл}}$ = ПОН»;

Правило 4: IF «Φ_{n+1} = НВД» and «$\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = СР», then «$U^{\text{сл}}$ = СПОН».

Дальнейшие действия аналогичны шагам III, IV, V первого алгоритма.

Когда ситуация принадлежит классу $K_{\text{n,n+1}}$, тогда синтезируются управляющие воздействия, учитывающие отклонения влажности материала в двух камерах одновременно. При этом следует произвести следующие шаги:

I. Фаззификация входных переменных Φ_n, Φ_{n+1}, $\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$ и определение значений функций принадлежности их термов.

II. Нечеткий вывод по следующим продукционным правилам:

Правило 1: IF «Φ_n = ННД» and «Φ_{n+1} = ВД» and «$\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = М», then «$U^{\text{сл}}$ = ПОН»;

Правило 2: IF «Φ_n = НД» and «Φ_{n+1} = ВД»and«$M_k^к$ = М», then «$U^{сл}$ = ПОН»;

Правило 3: IF «Φ_n = ВД» and «Φ_{n+1} = ВД»and«$M_k^к$ = М», then «$U^{сл}$ = ПОН»;

Правило 4: IF «Φ_n = НВД» and «Φ_{n+1} = ВД» and «$M_k^к$ = М», then «$U^{сл}$ = СПОН»;

Правило 5: IF «Φ_n = ННД» and «Φ_{n+1} = НВД» and «$M_k^к$ = М», then «$U^{сл}$ = СПОН»;

Правило 6: IF «Φ_n = НД» and «Φ_{n+1} = НВД» and «$M_k^к$= М», then «$U^{сл}$ = СПОН»;

Правило 7: IF «Φ_n = НД» and «Φ_{n+1} = ВД»and«$M_k^к$ = М», then «$U^{сл}$ = СПОН»;

Правило 8: IF «Φ_n = НВД» and «Φ_{n+1} = НВД» and «$M_k^к$ = М», then «$U^{сл}$ = СПОН»;

Правило 9: IF «Φ_n = ВД» and «Φ_{n+1} = ННД» and «$M_k^к$ = СР», then «$U^{сл}$ = ПОН»;

Правило 10: IF «Φ_n = НВД» and «Φ_{n+1} = ННД» and «$M_k^к$ = СР», then «$U^{сл}$ = СПОН»;

Правило 11: IF «Φ_n = ВД» and «Φ_{n+1} = НД» and «$M_k^к$ = СР», then «$U^{сл}$ = ПОН»;

Правило 12: IF «Φ_n = НВД» and «Φ_{n+1} = НД» and «$M_k^к$ = СР», then «$U^{сл}$ = СПОН»;

Правило 13: IF «Φ_n = ВД» and «Φ_{n+1} = ННД» and «$M_k^к$ = В», then «$U^{сл}$ = О»;

Правило 14: IF «Φ_n = НВД» and «Φ_{n+1} = ННД» and «$M_k^к$ = В», then «$U^{сл}$ = ПОН»;

Правило 15: IF «Φ_n = ВД» and «Φ_{n+1} = НД» and «$M_k^к$ = В», then «$U^{сл}$ = О»;

Правило 16: IF «Φ_n = НВД» and «Φ_{n+1} = НД»and«$M_k^к$ = В», then «$U^{сл}$ = ПОН»;

Правило 17: IF «Φ_n = ВД» and «Φ_{n+1} = ННД» and «$M_k^к$ = М», then «$U^{сл}$ = ПОН»;

Правило 18: IF «Φ_n = НВД» and «Φ_{n+1} = ННД» and «$M_k^к$ = М», then «$U^{сл}$ = СПОН»;

Правило 19: IF «Φ_n = ВД» and «Φ_{n+1} = НД» and «$M_k^к$ = М», then «$U^{сл}$ = ПОН»;

Правило 20: IF «Φ_n = НВД» and «Φ_{n+1} = НД» and «$M_k^к$ = М», then «$U^{сл}$ = СПОН»;

Правило 21: IF «Φ_n = ННД» and «Φ_{n+1} = ВД» and «$M_k^к$ = СР», then «$U^{сл}$ = ПОН»;

Правило 22: IF «Φ_n = НД» and «Φ_{n+1} = ВД» and «$M_k^к$ = СР», then «$U^{сл}$ = ПОН»;

Правило 23: IF «Φ_n = ННД» and «Φ_{n+1} = НВД» and «$M_k^к$ = СР», then «$U^{сл}$ = СПОН»;

Правило 24: IF «Φ_n = НД» and «Φ_{n+1} = НВД» and «$M_k^к$ = СР», then «$U^{сл}$ = СПОН».

В заключение повторяются шаги III, IV, V первого алгоритма.

Метод выбора параметров режима сушки пастообразных материалов в многокамерных сушильных установках с изменением скорости движения пластинчатого конвейера заключается в следующем [209]:

I. Определяются текущая скорость движения пластинчатого конвейера и соответствующее ей время пребывания пастообразного материала в контролируемых камерах.

II. Снимаются показания с интеллектуального датчика влажности пастообразного материала φ_n в n-ой камере.

III. Находятся нормированный диапазон влажности (см. табл. 3.1 раздела 3) и соответствующее ему множества гипотез $m_1(\mathcal{W})$.

IV. Снимаются показания с интеллектуального датчика влажности пастообразного материала φ_{n+1} в $(n+1)$-ой камере.

V. Определяется нормированный диапазон влажности (см. табл. 3.1 раздела 3) и соответствующее множества гипотез $m_2(\mathcal{D})$.

VI. Методом Демпстера-Шафера рассчитываются числовые оценки мер доверия достижения требуемого качества материала на выходе ТТА при используемой скорости движения пластинчатого конвейера.

VII. Производится нечеткий вывод по продукционным правилам, соответствующим идентифицированному классу ситуаций, и определяется по формуле (5.32) синтезируемое значение управляющего воздействия $(\Delta u_o^{сл})^*$, на которое необходимо изменить скорость движения ленты.

VIII. Производится изменение скорости ленты.

IX. Выполняется переход к первому шагу.

Из рассмотренных алгоритмов видно, что в них играет важную роль влажность материала в контролируемых камерах. Для получения необходимой информации разработан интеллектуальный датчик влажности материала, который используется для определения φ_n, $\varphi_n^{к}$, φ_{n+1} и $\varphi_{n+1}^{к}$ по значениям возмущающих и управляющих воздействий [22]. Рассмотрим алгоритм оценки влажности материала.

5.5 Метод оценки влажности движущегося пастообразного материала и методика построения интеллектуального датчика влажности, лежащего в его основе

В основе метода, описанного в данном пункте, лежит способ оценки влажности пастообразного материала в процессе его сушки (см. патент [210]).

С целью выработки управляющих воздействий на процесс сушки и своевременной его коррекции для достижения необходимого уровня качества материала на выходе ТТА с применением ИИУС требуется постоянный мониторинг его влажности в контролируемых камерах.

Мониторинг влажности материала проводится с применением интеллектуального датчика влажности (ИДВ) [22].

Для построения ИДВ предложена методика, которая включает следующие этапы:

1) формирование, исходя из задач управления, необходимых требований к ИДВ;

2) выделение контролируемых камер ТТА;

3) определение параметров, оказывающих существенное влияние на влажность материала в контролируемых камерах и его влажность на выходе ТТА;

4) сбор массива экспериментальных данных о значениях влажности материала в контролируемых камерах ТТА, и данных о параметрах модели, оказывающих существенное влияние на влажность;

5) разделение множества полученных данных на два подмножества (обучающее и тестовое);

6) выбор типа нейронной сети;

7) обучение выбранной нейронной сети для каждой контролируемой камеры;

8) проверка адекватности выбранной сети;

9) поиск соответствующего микропроцессорного устройства для создания ИДВ;

10) создание программ и алгоритмов для ИДВ [44].

Построенные согласно приведенной методике ИДВ устанавливаются на все сушильные установки, находящиеся в цехе. Архитектура системы мониторинга влажности приведена на рис. 5.13.

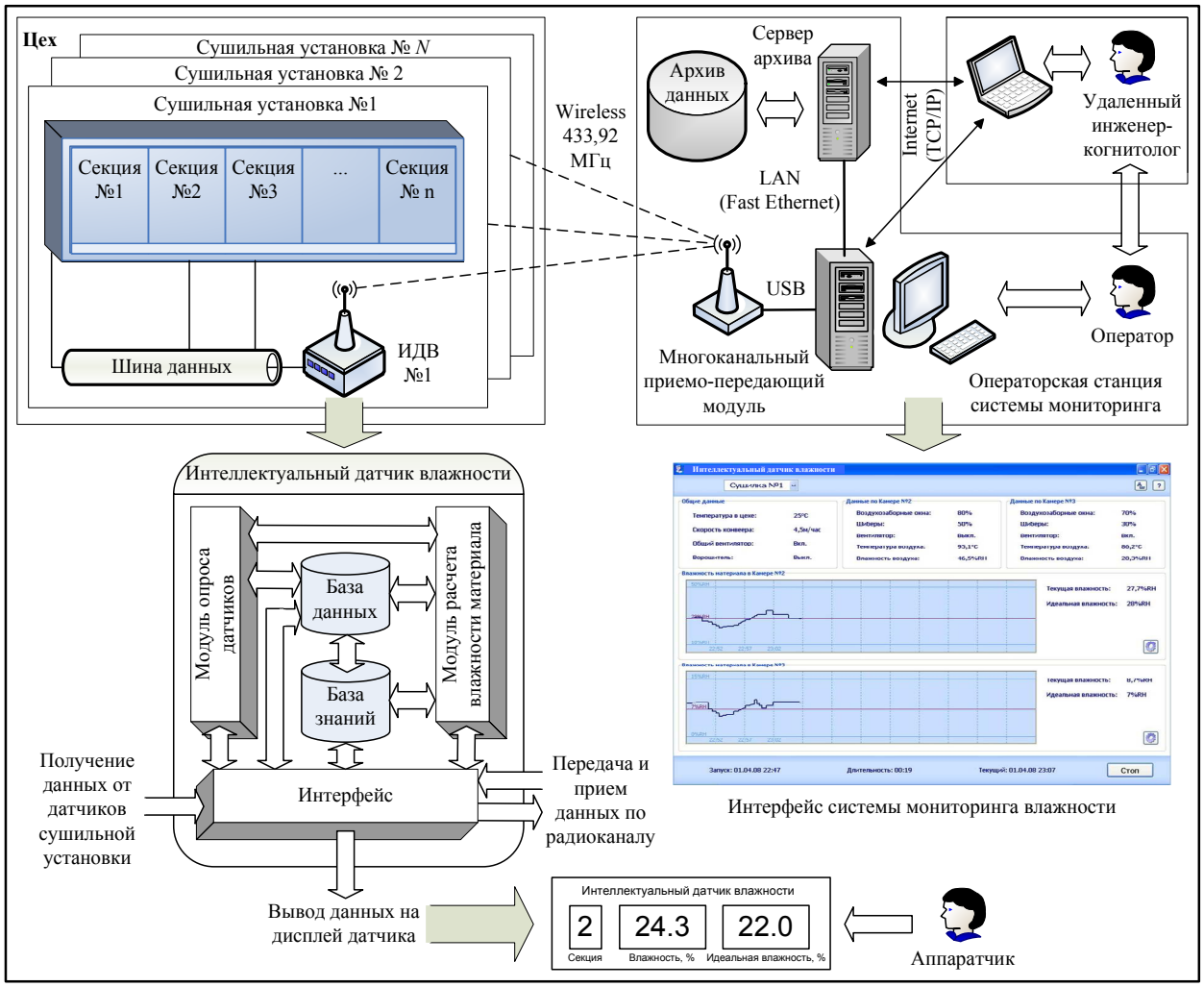


Рисунок 5.13. Архитектура информационно-измерительной подсистемы или системы мониторинга влажности материала в процессе сушки

В состав системы мониторинга влажности материала входит операторская станция [254]. К основным функциям программного обеспечения операторской станции относятся:

1. Сбор и обработка данных, сохранение информации о параметрах тепло-технологического процесса и состоянии оборудования сушильной установки, полученной с ИДВ;

2. Отображение информации о текущих параметрах процесса сушки и графиков текущих значений относительной влажности материала в реальном времени за заданный интервал на экране операторской станции в удобном для оператора виде;

3. Выявление аварийных (критических) ситуаций и вывод на монитор операторной станции соответствующих технологических сообщений;

4. Архивирование истории изменения технологических параметров в процессе сушки на сервере архива данных.

К архиву данных имеет доступ инженер-когнитолог. В перечень выполняемых им функций входит переобучение нейронных сетей, корректировка моделей базы знаний и статических данных базы данных. Необходимость в этом может возникать в случае замены высушиваемого материала или технологического оборудования сушильных установок, подключения ИДВ к другим секциям или сушильным установкам и т.д.

Ядром информационно–измерительной подсистемы является база знаний. В ней знания представлены в виде сетевой модели, которую можно записать в следующем виде:

$$\mathrm{M}_n = \{X, W, S, C, V, f\},$$

где M – модель сети, n – номер модели сети, X – множество элементов входного слоя сети, W – матрица связей (веса синапсов нейронов скрытого слоя), S – множество массивов параметров (коэффициенты углов и сдвигов сигмоидальной функции) состояний нейронов скрытого слоя, C – множество нейронов скрытого слоя, V –вектор связей (веса аксонов нейронов скрытого слоя), f – сигмоидальная активационная функция [22, 44].

Фрагмент информационной модели представлен на Рис. 5.14.

База данных содержит данные двух видов статические и динамические. К статическим относятся данные, определяемые на этапе обучения сетей. К ним относятся коэффициенты нормализации входных данных сетей (амплитудные и офсетные) и коэффициенты денормализации выходных данных сетей, и области допустимых значений выходных переменных. После опроса датчиков ИДВ, т.е. получения входных данных нейронных сетей, формируются так называемые динамические данные.

Алгоритм работы системы мониторинга влажности следующий. В модуль расчета влажности из базы знаний передаются знания о структуре нейронных

сетей, а из базы данных амплитудные и офсетные коэффициенты нормализации входных и денормализации выходных данных сетей, и области допустимых значений выходных переменных (определяемые при обучении сетей).

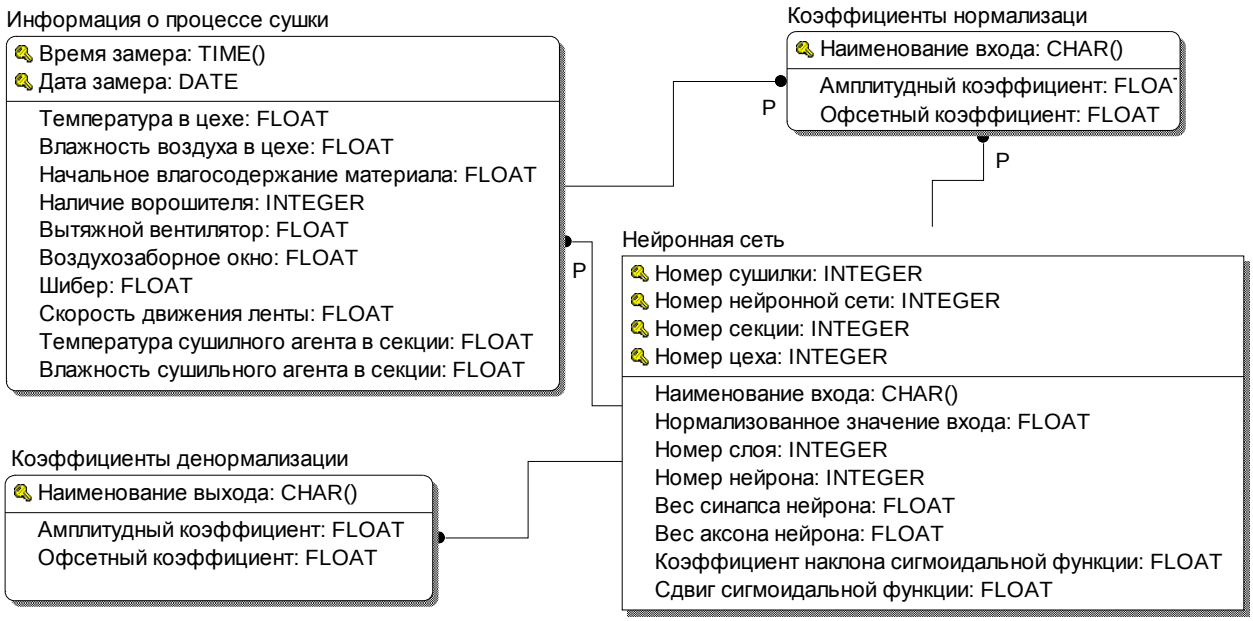


Рисунок 5.14 Фрагмент информационной модели (ER-модель) базы данных системы мониторинга влажности

Согласно алгоритму оценки влажности материала производится опрос датчиков, установленных в ТТА, в результате определяются показания влажности и температуры в цехе, скорости движения пластинчатого конвейера, режима работы вытяжного вентилятора, степени открытия шиберов и воздухозаборных окон, температуры и влажности воздуха в контролируемых камерах. Эти данные заносятся в базу данных и передаются в модуль расчета влажности, который производит их нормализацию, а также расчет по аналитическим моделям значений влажности материала и их денормализацию. Денормализованные значения влажности пастообразного материала также заносятся в базу данных.

В результате работы модуля расчета влажности данные выводятся на дисплей ИДВ, а затем отправляются в многоканальный приемо-передающий модуль по радиоканалу. Приемо-передающий модуль получает данные от всех ИДВ, функционирующих в цехе, которые он передает в свою очередь по

интерфейсу USB на операторскую станцию системы мониторинга. Эти данные дублируются в управляющей подсистеме. У оператора системы имеется возможность контролировать процесс сушки в сушильных установках, оборудованных ИДВ, на мониторе операторской станции системы.

Множество технических средств $\mathcal{IS}^{\text{И}}$, используемых для измерения необходимых величин, включает следующие основные элементы: микроконтроллер; датчики, определяющие влажность воздуха и сушильного агента, температуру воздуха и сушильного агента, положения, скорости и др., постоянная память для хранения необходимой информации и т.д.

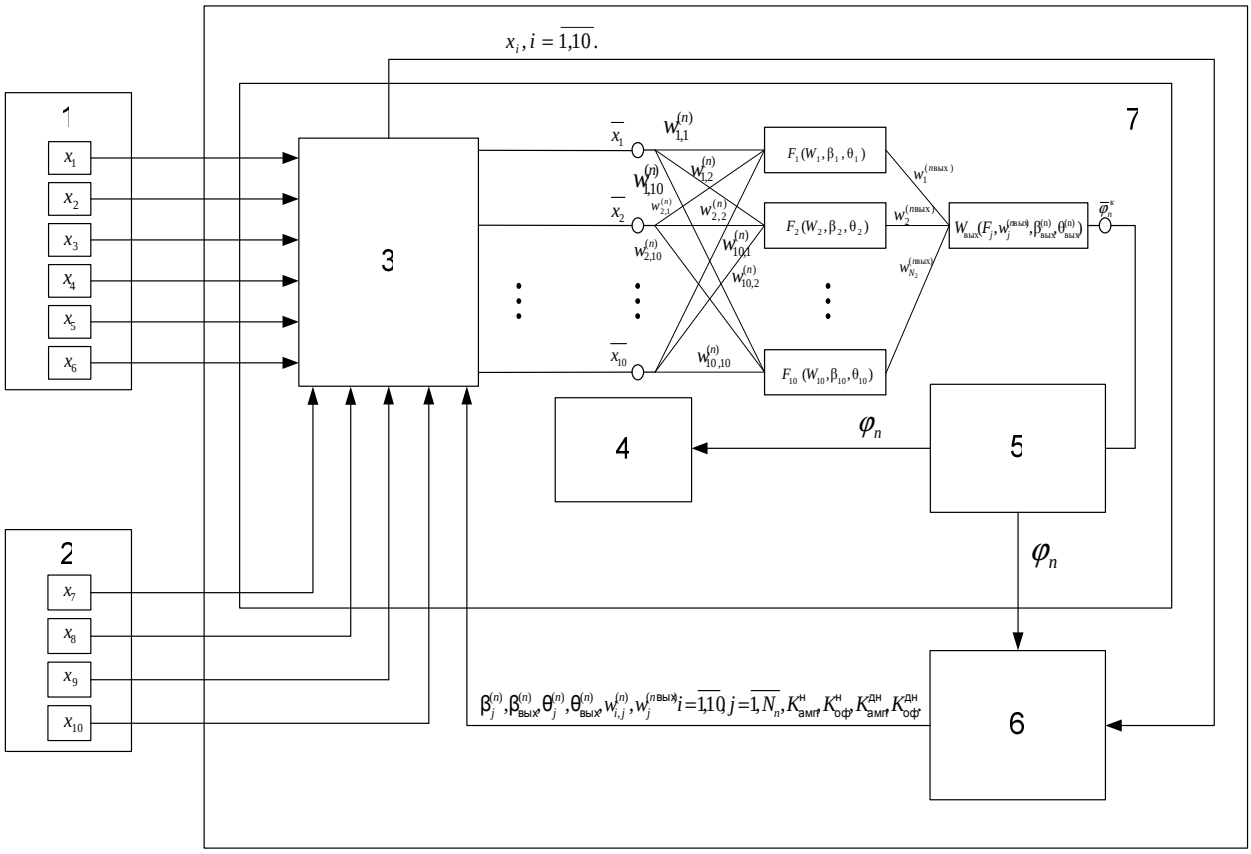
Основными аппаратными средствами информационно-измерительной подсистемы являются компьютер удаленного инженера-когнитолога, операторская станция ИИУС СВЛ, сервер архива данных, интеллектуальные датчики влажности, многоканальные приемо-передающие модули.

Функциональная схема интеллектуального датчика влажности материала представлена на рис. 5.15.

Для оценки влажности пастообразного материала в процессе его сушки в вальцеленточной сушильной установке необходимо однократно провести настройку ИДВ осуществляющего мониторинг [210]. Для чего определяют самую напряженную по влагосъему камеру, в которую устанавливают необходимые датчики. Согласно рис.5.16 для пятисекционной сушильной установки самой напряженной по влагосъему является камера номер два ($n = 2$).

По выборке результатов измерений полученных с установленных датчиков, хранящихся в памяти ИДВ, а также по образцовым мерам обучают на персональном компьютере с использованием специализированных программ нейронную сеть.

Полученные параметры сети – $\beta_j^{(n)}$, $\beta_{\text{вых}}^{(n)}$, $\theta_j^{(n)}$, $\theta_{\text{вых}}^{(n)}$, $w_{i,j}^{(n)}$, $w_j^{(n\ \text{вых})}$, N_n записывают в память ИДВ (блок накопления статистики, обучения и корректировки нейронной сети см. рис. 5.15 блок 6), после чего ИДВ готов к использованию.



1 - Общие датчики.
2 - Датчики камеры n.
3 - Блок нормирования и расчета входных значений.
4 - Блок отображения текущей влажности.
5 - Блок денормирования.
6 - Блок накопления статистики, обучения и корректировки нейросети.
7 - Микроконтроллер.

Рисунок 5.15 Функциональная схема ИДВ

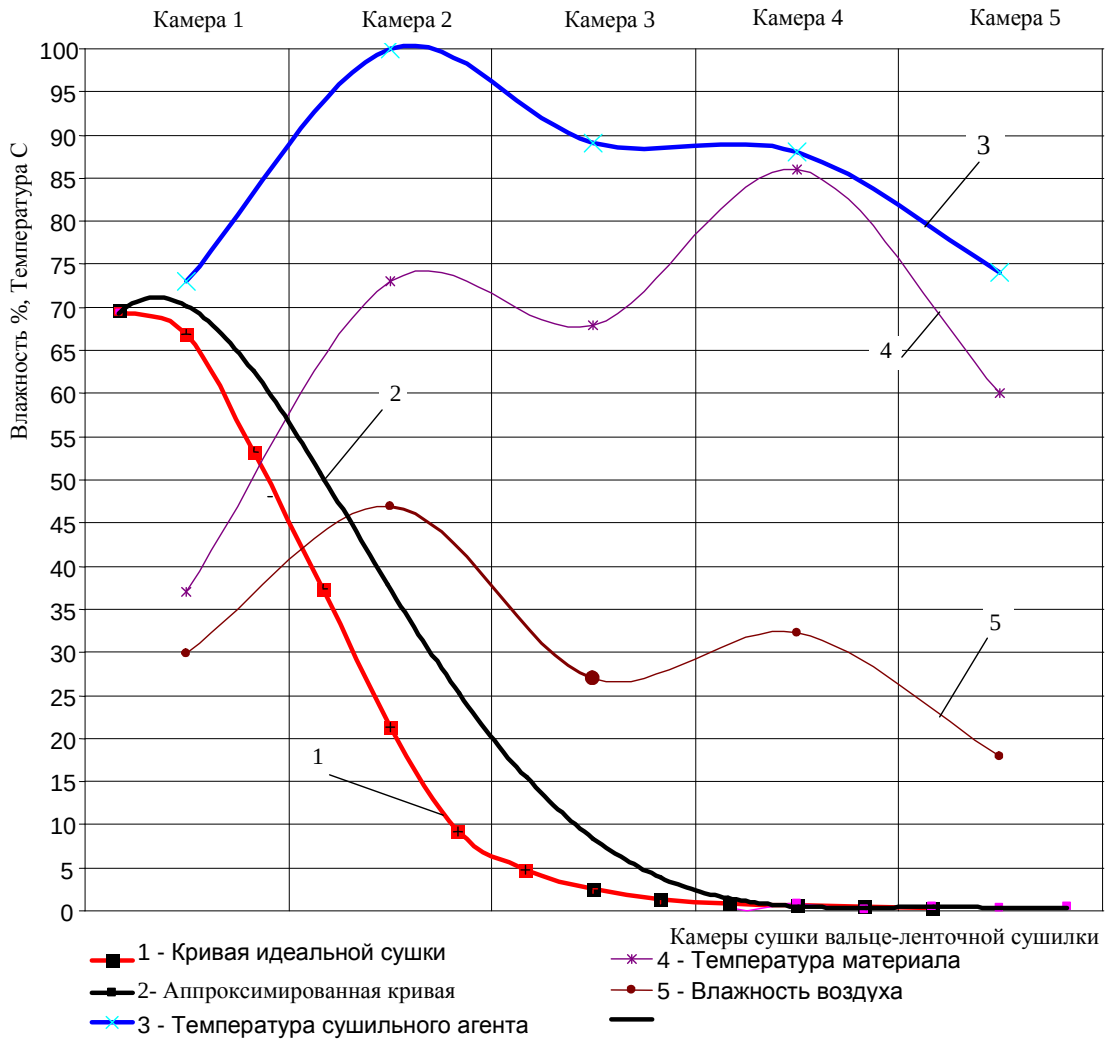


Рисунок 5.16. Кинетические кривые процесса сушки в вальцеленточной сушильной установке

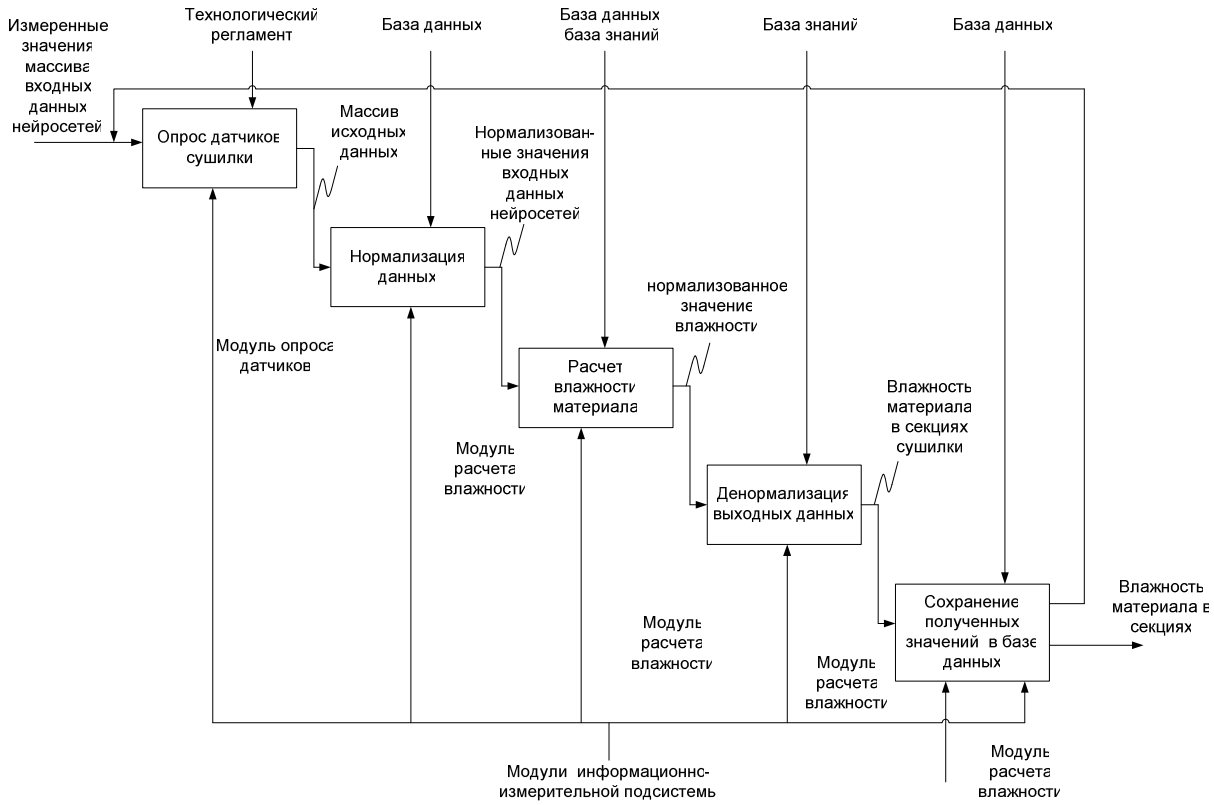


Рисунок 5.17 Функциональная модель интеллектуального датчика влажности

Функциональная модель интеллектуального датчика влажности представлена на рис 5.17.

Алгоритм оценки влажности материала состоит из следующих шагов.

I. Опрос физических датчиков ТТА, и вычисление входных значений нейронной сети.

II. Проверка выполнения условия вхождения полученных значений в адаптивные диапазоны, примененных для обучения нейронной сети. В том случае, когда условия не выполнены, данные записываются в память (накопление статистики), о чем сообщается оператору.

III. Нормализация полученных значений (3.52).

IV. Расчет влажности материала по аналитической модели (3.54).

V. Денормализация значений влажности пастообразного материала (3.55).

VI. Накопление статистики (сохранение в памяти устройства рассчитанных значений).

ИДВ позволяет проводить оперативную оценку в реальном масштабе времени влажности движущегося материала в процессе сушки. Оперативная

оценка дает возможность, в случае отклонения значения влажности от идеальной влажности для n камеры, своевременно изменять настройки сушильной установки (скорость движения ленты, степень открытия воздухозаборного окна и шибера) с целью повышения качества сушки пастообразного материала.

5.6 Адаптивный алгоритм функционирования интеллектуального датчика влажности

В качестве одного из важных свойств системы мониторинга можно отметить свойство диагностического самоконтроля. Способность к самоконтролю характеризует способность датчика сохранять характеристики в допустимых для потребителя пределах при возникновении отказов датчиков его информационных каналов.

Интеллектуальные датчики традиционно совершенствуются путем улучшения их конструкций и элементов, а также за счет создания методов описания и последующего анализа измерительных процедур. При синтезе интеллектуальных датчиков обычно применяется аналитический подход, способствующий разработке оптимальных алгоритмов обработки данных на основе все более усложняющихся стохастических моделей воздействия на датчик. Альтернативой этой стратегии служит метод реализации интеллектуальных датчиков с применением нейронных сетей. Функционирование интеллектуальных датчиков обеспечивается учетом реальных данных, отражающих исследуемый физический объект.

Для создания алгоритмов необходимо выполнение следующих шагов:

– определение режимов функционирования интеллектуальной измерительной системы в различных ситуациях, в том числе в экстремальных;

– обучение интеллектуального датчика с учетом особенностей исследуемого процесса;

– формирование логики функционирования системы диагностики в случае отказа какого-либо датчика.

В основе технического обеспечения ИДВ лежит микроконтроллер MSP430 фирмы Texas Instruments. В данном устройстве используются датчики влажности и температуры SH15 фирмы Sensirion, внешние для измерения начальной температуры и влажности сушильного агента и внутренние для измерения текущей температуры и влажности в секциях. Также используются датчики определения скорости движения конвейера, включения общего вытяжного вентилятора, общие для всей сушильной установки, а также индивидуальные датчики контролируемых камер: степени открытия шиберов и воздухозаборных окон. Необходимая информация хранится в устройстве постоянной памяти DataFlash. Таким образом, в состав каждого ИДВ входят не менее девяти датчиков, отказы, работы которых могут оказывать существенное влияние на точность определения влажности.

Для устранения этого недостатка расширим множество моделей определения влажности. В условиях безотказной работе датчиков используются аналитические модели вида (3.53) в расчете по которым используются информация, поступающая от всех датчиков. В случае отказа одного или нескольких датчиков предлагается проводить расчеты по моделям, в которых учтены эти ситуации.

Для построения расширенного множества моделей выделим четыре группы датчиков по степени важности поступающих от них информации. Нулевая группа класс ситуаций G_0 – безотказная работа всех датчиков. К первой группе классу ситуаций G_1 – мягкие отказы датчиков, относятся датчики информация, от которых представляет собой помехи по каналу измерения, например внешний датчик начальной температуры и влажности сушильного агента или датчик наличия или отсутствия ворошителя, отвечающего за равномерность слоя материала на ленте. В случае их отказа учитывается межсезонная среднестатистическая температура и влажность в цехе, и среднее значение толщины слоя пасты.

Во вторую группу класс ситуаций G_2 – средние отказы датчиков, входят датчики открытия окон и шиберов, информация от которых отражает настройки

камер сушильной установки. Если происходят отказы датчиков этой группы, то используются модели без учета степени открытия шиберов и окон в секциях.

Третья группа класс ситуаций G_3 – жесткие отказы датчиков, содержит датчики определения скорости движения конвейера, включения общего вытяжного вентилятора, температуры и влажности сушильного агента в секциях, отказ которых наиболее опасен, так как приводит к ошибкам измерения влажности материала и управления процессом сушки.

В таблице 5.14 приведены соответствия классов ситуациям, отсутствующим параметрам моделей и идентификаторам используемых в этом случае моделей.

Таблица 5.14 Классы ситуаций и отказы датчиков

Класс ситуации	Ситуация	Неизвестный параметр модели	Идентификатор модели
G_0	Безотказная работа всех датчиков ИДВ		m_1, m_2
G_1	Отказ датчика температуры и влажности в цехе	x_2, x_3	m_3
	Отказ датчика наличия ворошителя	x_5	m_4
G_2	Отказ датчика открытия шиберов	x_{10}	m_5 , m_6
	Отказ датчика открытия окон	x_9	m_7 , m_8
	Отказ датчика начальной влажности материала	x_1	m_9
G_3	Отказ датчика скорости движения конвейера	x_4	m_{10}
	Отказ датчика включения/выключения вытяжного вентилятора	x_6	m_{11}
	Отказ датчика температуры и влажности сушильного агента в камерах	x_7 , x_8	m_{12} , m_{13}

Расширенное множество моделей включает следующие модели для n и $n+1$ контролируемых камер следующих групп:

G_0 – модели m_1 и m_2;

G_1 – модели m_3, m_4 отличительной особенностью работы, которых является получение информации о начальной температуре и влажности сушильного агента не от датчиков, а из базы данных. Модель m_5 аналогичная m_1, но без учета ворошителя;

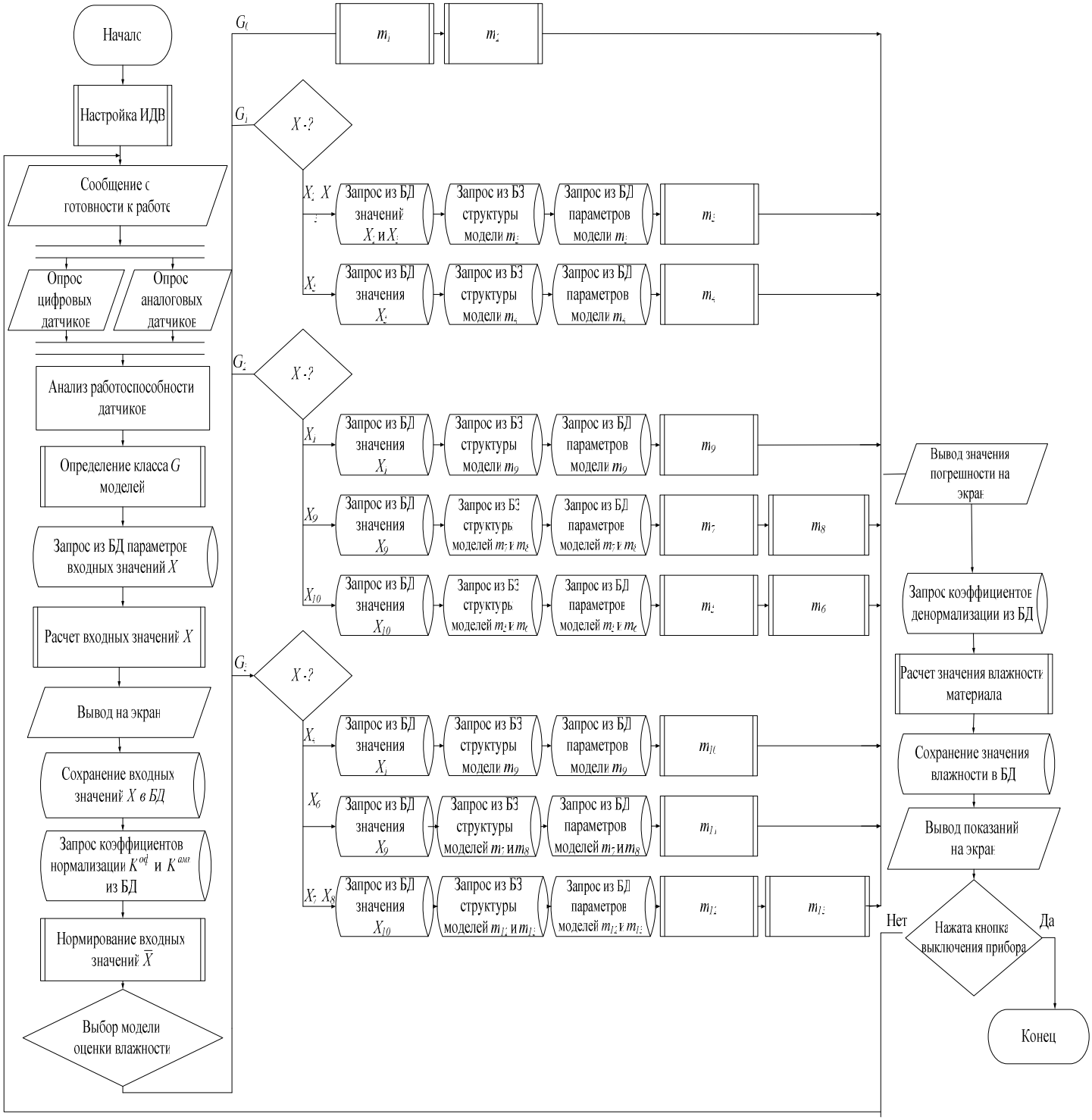


Рисунок 5.18. Адаптивный алгоритм функционирования ИДВ

G_2 – модели m_6 и m_7 без учета изменения степени открытия шиберов; модели m_8 и m_9 без учета степени открытия воздухозаборных окон в n и $n+1$ секциях соответственно;

G_3 – модель m_{10} без учета периодичности работы вытяжного вентилятора, модель m_{11} без учета работы вытяжного вентилятора, модель m_{12} без учета температуры сушильного агента, модель m_{13} без учета влажности сушильного агента.

Модели оценки влажности содержатся в базе знаний ИДВ и имеют следующий вид:

– модель m_3 аналогична модели (3.53),

– модель m_4

$$\overline{\varphi_i} = \left[1+\exp\left(-\beta_{\text{вых}}^{(i)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_i} w_j^{(i\ \text{вых})} \cdot \left(1+\exp\left(-\beta_j^{(i)} \cdot \left[w_{1,j}^{(i)} \cdot \overline{x_1} + w_{2,j}^{(i)} \cdot \overline{x_2} + w_{3,j}^{(i)} \cdot \overline{x_3} + w_{4,j}^{(i)} \cdot \overline{x_4} + \right.\right.\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\left.\left. + w_{6,j}^{(i)} \cdot \overline{x_6} + w_{7,j}^{(i)} \cdot \overline{x_7} + w_{8,j}^{(i)} \cdot \overline{x_8} + w_{9,j}^{(i)} \cdot \overline{x_9} + w_{10,j}^{(i)} \cdot \overline{x_{10}}\right] - \theta_j^{(i)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{вых}}^{(i)}\right)\right]^{-1},$$

– модели m_5 , m_6

$$\overline{\varphi_i} = \left[1+\exp\left(-\beta_{\text{вых}}^{(i)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_i} w_j^{(i\ \text{вых})} \cdot \left(1+\exp\left(-\beta_j^{(i)} \cdot \left[w_{1,j}^{(i)} \cdot \overline{x_1} + w_{2,j}^{(i)} \cdot \overline{x_2} + w_{3,j}^{(i)} \cdot \overline{x_3} + w_{4,j}^{(i)} \cdot \overline{x_4} + \right.\right.\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\left.\left. + w_{5,j}^{(i)} \cdot \overline{x_5} + w_{6,j}^{(i)} \cdot \overline{x_6} + w_{7,j}^{(i)} \cdot \overline{x_7} + w_{8,j}^{(i)} \cdot \overline{x_8} + w_{9,j}^{(i)} \cdot \overline{x_9}\right] - \theta_j^{(i)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{вых}}^{(i)}\right)\right]^{-1},$$

- модели m_7 , m_8

$$\overline{\varphi_i} = \left[1+\exp\left(-\beta_{\text{вых}}^{(i)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_i} w_j^{(i\ \text{вых})} \cdot \left(1+\exp\left(-\beta_j^{(i)} \cdot \left[w_{1,j}^{(i)} \cdot \overline{x_1} + w_{2,j}^{(i)} \cdot \overline{x_2} + w_{3,j}^{(i)} \cdot \overline{x_3} + w_{4,j}^{(i)} \cdot \overline{x_4} + \right.\right.\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\left.\left. + w_{5,j}^{(i)} \cdot \overline{x_5} + w_{6,j}^{(i)} \cdot \overline{x_6} + w_{7,j}^{(i)} \cdot \overline{x_7} + w_{8,j}^{(i)} \cdot \overline{x_8} + w_{10,j}^{(i)} \cdot \overline{x_{10}}\right] - \theta_j^{(i)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{вых}}^{(i)}\right)\right]^{-1},$$

– модель m_9

$$\overline{\varphi_i} = \left[1+\exp\left(-\beta_{\text{вых}}^{(i)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_i} w_j^{(i\ \text{вых})} \cdot \left(1+\exp\left(-\beta_j^{(i)} \cdot \left[w_{2,j}^{(i)} \cdot \overline{x_2} + w_{3,j}^{(i)} \cdot \overline{x_3} + \right.\right.\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\left.\left. + w_{5,j}^{(i)} \cdot \overline{x_5} + w_{6,j}^{(i)} \cdot \overline{x_6} + w_{7,j}^{(i)} \cdot \overline{x_7} + w_{8,j}^{(i)} \cdot \overline{x_8} + w_{9,j}^{(i)} \cdot \overline{x_9} + w_{10,j}^{(i)} \cdot \overline{x_{10}}\right] - \theta_j^{(i)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{вых}}^{(i)}\right)\right]^{-1},$$

– модель m_{10}

$$\overline{\varphi_i} = \left[1+\exp\left(-\beta_{\text{вых}}^{(i)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_i} w_j^{(i\ \text{вых})} \cdot \left(1+\exp\left(-\beta_j^{(i)} \cdot \left[w_{1,j}^{(i)} \cdot \overline{x_1} + w_{2,j}^{(i)} \cdot \overline{x_2} + w_{3,j}^{(i)} \cdot \overline{x_3} + \right.\right.\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\left.\left. + w_{5,j}^{(i)} \cdot \overline{x_5} + w_{6,j}^{(i)} \cdot \overline{x_6} + w_{7,j}^{(i)} \cdot \overline{x_7} + w_{8,j}^{(i)} \cdot \overline{x_8} + w_{9,j}^{(i)} \cdot \overline{x_9} + w_{10,j}^{(i)} \cdot \overline{x_{10}}\right] - \theta_j^{(i)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{вых}}^{(i)}\right)\right]^{-1},$$

– модель m_{11}

$$\overline{\varphi_i} = \left[1+\exp\left(-\beta_{\text{вых}}^{(i)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_i} w_j^{(i\ \text{вых})} \cdot \left(1+\exp\left(-\beta_j^{(i)} \cdot \left[w_{1,j}^{(i)} \cdot \overline{x_1} + w_{2,j}^{(i)} \cdot \overline{x_2} + w_{3,j}^{(i)} \cdot \overline{x_3} + w_{4,j}^{(i)} \cdot \overline{x_4} + \right.\right.\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\left.\left. + w_{5,j}^{(i)} \cdot \overline{x_5} + w_{7,j}^{(i)} \cdot \overline{x_7} + w_{8,j}^{(i)} \cdot \overline{x_8} + w_{9,j}^{(i)} \cdot \overline{x_9} + w_{10,j}^{(i)} \cdot \overline{x_{10}}\right] - \theta_j^{(i)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{вых}}^{(i)}\right)\right]^{-1},$$

– модель m_{12}, m_{13}

$$\overline{\varphi_i} = \left[1+\exp\left(-\beta_{\text{вых}}^{(i)} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_i} w_j^{(i\ \text{вых})} \cdot \left(1+\exp\left(-\beta_j^{(i)} \cdot \left[w_{1,j}^{(i)} \cdot \overline{x_1} + w_{2,j}^{(i)} \cdot \overline{x_2} + w_{3,j}^{(i)} \cdot \overline{x_3} + w_{4,j}^{(i)} \cdot \overline{x_4} + \right.\right.\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\left.\left. + w_{5,j}^{(i)} \cdot \overline{x_5} + w_{6,j}^{(i)} \cdot \overline{x_6} + w_{9,j}^{(i)} \cdot \overline{x_9} + w_{10,j}^{(i)} \cdot \overline{x_{10}}\right] - \theta_j^{(i)}\right)\right)^{-1}\right] - \theta_{\text{вых}}^{(i)}\right)\right]^{-1}.$$

Таким образом, если при опросе датчиков произошел отказ, то из базы знаний ИДВ автоматически выбирается модель, по которой с приемлемой погрешностью определяется влажность пастообразного материала. В результате работы адаптивного алгоритма ИДВ представляет собой отказоустойчивую систему. Адаптивный алгоритм функционирования ИДВ приведен на рис. 5.18.

ИДВ в процессе сушки пастообразного материала в сушильной установке вальцеленточного типа внедрен на ОАО «Пигмент» (г. Тамбов); его применение позволило увеличить выпуск качественной продукции. Таким образом, достигается поставленная техническая задача оперативной оценки влажности движущегося пастообразного материала в процессе его сушки в реальном масштабе времени. Оперативная оценка необходима для управления процессом сушки с целью обеспечения качества получаемого материала.

Выводы по пятой главе

1. Сформулированы и доказаны леммы для систем переменной структуры о моментах переключения между зонами. На основании, которых разработан алгоритм синтеза оптимальной программы управления при использовании многозонных моделей режима «Пуск».

2. Созданы алгоритмы оперативного интеллектуального синтеза энергосберегающих управляющих воздействий, позволяющие снизить негативное влияние ДФ в каналах управления и измерения.

3. Предложен метод настройки адаптивного регулятора с применением нечеткой логики. Разработаны алгоритмы мягкой и жесткой коррекции при управлении с адаптивной стратегией.

4. Созданы алгоритмы управления процессом сушки, обеспечивающие необходимое качество конечной продукции с максимально возможной производительностью, и синтезирующие управляющие воздействия в реальном масштабе времени при помощи нечеткого вывода на основе выбранной системы продукционных правил.

5. Разработан интеллектуальный датчик влажности, основанный на нейронных сетях, обучение которых организовано по образцовым мерам в адаптивном диапазоне контролируемых камер с фиксированной точностью, и методика построения интеллектуальных датчиков влажности.

6. Разработан метод оценки влажности пастообразного материала, базирующийся на адаптивном алгоритме функционирования, в результате работы которого интеллектуальный датчик представляет собой отказоустойчивую систему.

6 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО – УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Построение рабочих прототипов ИИУС ТТА проводится на базе исследовательского прототипа ИИУС ТТА. При этом идентифицируется модель предметной области рабочего прототипа конкретного ТТА. Определяются требуемые подсистемы, формируются базы данных и знаний. Для чего посредством перемещения по стратам интегрированного графа технологии алгоритмизации синтеза управляющих воздействий из общего множества информационных элементов (2.27), (2.28), алгоритмов (2.29), (2.30), функциональных программных модулей (2.31), (2.32) технических средств (2.33), (2.34) с учетом множества критериев (2.35) и ограничений (2.36), решая задачу нахождения проектного решения (2.40)-(2.52) определяется рабочий прототип ИИУС ТТА.

На стадии технического проектирования ИИУС ТТА особое внимание уделяется созданию математического, программного, информационного, интеллектуального, технического обеспечения системы и метрологическому анализу. В главе рассматриваются основные их особенности.

6.1 Особенности математического и программного обеспечения

Математический аппарат и построенные на его базе алгоритмы и методы определяют возможность ИИУС ТТА, без лица принимающего решение, в реальном режиме времени вырабатывать управляющее воздействие. Оперативная реализация управляющего воздействия минимизирующего энерго- или ресурсопотребление в режиме работы «Пуск» и потери качества и производительности в режиме «Процесс», является основной функциональной возможностью проектируемой системы.

Предлагаемое математическое обеспечение режима «Пуск» в отличие от классических задач оптимального управления (ЗОУ) допускает изменение пара-

метров объекта, вида его модели, граничных значений для управляющих воздействий и фазовых координат, т. е. изменение массива реквизитов ЗОУ на временном интервале управления. При каждом изменении состояния функционирования в реальном времени рассчитывается новое оптимальное управление для исходных данных ЗОУ на текущий момент времени. Математическое обеспечение ИИУС ТТА включает описанный в разделе четыре математический аппарат анализа и синтеза оптимального управления, позволяющий значительно снизить размерность задачи, что дает возможность управляющему устройству работать в реальном масштабе времени. Математическое обеспечение режима «Процесс» использует методы искусственного интеллекта, что также дает возможность принимать решения об управлении трудно формализуемыми теплотехнологическими процессами в реальном режиме времени.

Представленный в данной работе математический аппарат лежит в основе базы знаний и основных функциональных программных модулей исследовательского прототипа ИИУС ТТА. Одной из задач построения рабочего прототипа ИИУС ТТА является выбор множества требуемого математического обеспечения из общего множества математического обеспечения исследовательского прототипа.

При создании программного обеспечения ИИУС ТТА был использован объектно-ориентированный подход одним из главных преимуществ, которого является возможность разработать компоненты один раз и многократно их использовать. Это преимущество позволяет оперативно осуществлять построение рабочего прототипа на базе исследовательского, инвариантного различным ТТА.

Разработка прототипов ИИУС ТТА производится в рамках спиральной модели жизненного цикла информационных систем в соответствии со стандартом ISO/IEC 12207. В настоящее время при разработке объектно-ориентированных информационных систем часто используется промышленный стандарт нотации унифицированного языка моделирования (unified modeling language) UML. Он является основной платформы для ускоренной разработки приложений (RAD, rapid application development).

UML – инструмент анализа и проектирования объектно-ориентированных систем, позволяющих моделировать их до написания программного кода. Это дает возможность оперативно учитывать особенности, проектируемых ИИУС ТТА, на стадии моделирования и создавать адекватные архитектуры. Средства некоторых инструментальных сред языка UML, позволяют генерировать «скелетный программный код» на большом количестве различных языков, а также выполнять обратное проектирования кода, создавая, таким образом, модели уже существующих систем [249].

При проектировании баз данных ИИУС ТТА использовались реляционные модели, которые создавались с использованием CASE-средства ERwin 4.0 (Computer Associates). При создании функциональных моделей ИИУС ТТА применялось CASE-средство BPwin 4.0 (Computer Associates).

В результате проектирования функционирование исследовательского прототипа ИИУС ТТА может осуществляться на базе таких операционных систем, как Microsoft Windows 9x, ME, NT, 2000, XP. В случае необходимости внесения изменений в программный код рекомендуется использовать среду визуального программирования а также RAD-системы Borland Developer Studio и некоторые шаблоны проектирования, такие как Facade, Adapter, Bridge, Abstract Factory [264]. Функционирование рабочего прототипа осуществляется на базе платформы выбранных технических средств.

Ядром программного обеспечения ИИУС ТТА служит база знаний, процедурные знания в которой представлены виде фреймов, реализующих алгоритмическое обеспечение ИИУС ТТА. База знаний, имеет стратифицированную, иерархическую структуру, отражающую интегрированный граф технологии синтеза решения ЗОУ. Содержание фреймов базы знаний обеспечивает поиск решения задачи ОУ в пространстве состояний. Фреймы включают слоты, содержащие не только конкретные данные, но и имена процедур, осуществляющую их обработку по заданному алгоритму. Некоторые фреймы содержат слоты, заполнителями которых являются правила продукций. При создании базы знаний ис-

следовательского прототипа проводилась работа по унификации имен фреймов, это дает возможность оперативного построения баз знаний рабочих прототипов.

Фреймы знаний представляет собой набор классов, разработанных в среде визуального программирования Borland Developer Studio 2006 на языке Object Pascal.



Рисунок 6.1 Структурная схема взаимодействия типовых модулей анализа и синтеза управления исследовательского прототипа режима «Пуск»

Используемый объектно-ориентированный подход дает возможность создавать не только программное обеспечение функциональных модулей, баз данных и знаний ИИУС ТТА, но и удобный для пользователей интерфейс. Интерфейс позволяет обеспечить работу пользователя исследовательского прототипа ИИУС ТТА в отдельных функциональных модулях. Он включает большое количество разнообразных меню: вертикальных, горизонтальных, кнопочных, диало-

говых окон, окон редактирования информации сопровождающейся контекстной подсказкой, а также когнитивных графических средств отображения информации, реализованных на разных уровнях работы.

Основными по функциональной нагрузке программными модулями исследовательского прототипа ИИУС ТТА, являются модули: идентификации модели объекта, анализа и синтеза задачи управления, стыковки зон при использовании многозонных моделей (режим «Пуск»). Математическое, методическое и алгоритмическое обеспечение этих модулей приведено в предыдущих главах. Структурные схемы их взаимодействия представлены на рис. 6.1 и рис. 6.2. Из структурной схемы рис.6.1 видно функциональное назначение каждого блока. Созданный пакет программ также является составной частью экспертной системы (ЭС) «Энергосберегающее управление динамическими объектами» [268].

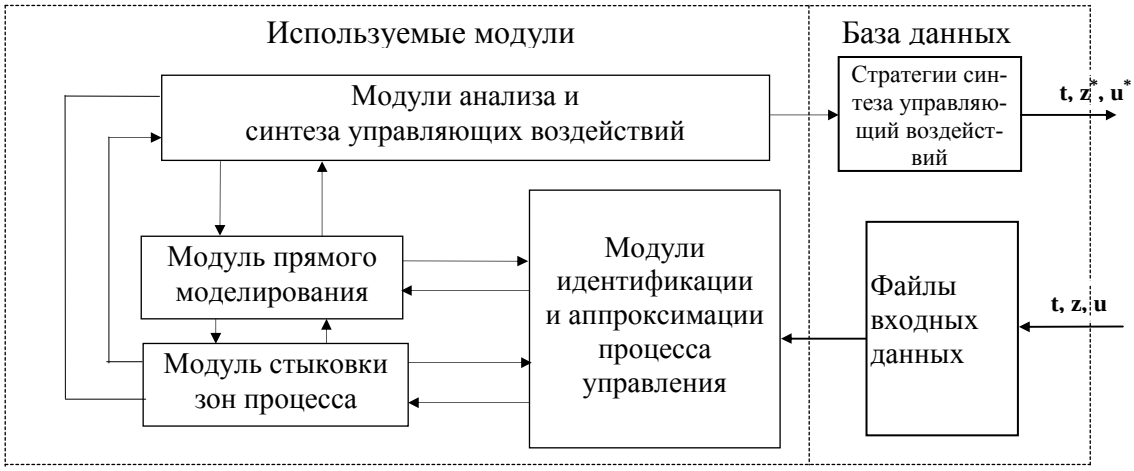


Рисунок 6.2 Структурная схема взаимодействия программных модулей при решении задач анализа и синтеза энерго- или ресурсосберегающего управления для объектов, описываемых многозонными моделями (режим «Пуск»)

На рис. 6.2 приведена структурная схема взаимодействия программных модулей исследовательского прототипа ИИУС ТТА. Она выполняет следующие функции: идентификацию модели объекта на МСФ (получение «многозонной модели»); расчет параметров модели объекта; расчет параметров функций управления при использовании программной стратегии; проверка выполнения

условий существования функций управляющих воздействий для заданного массива исходных данных; определение вида функции; расчет оптимальной траектории изменения фазовых координат и значения функционала; формирование алгоритмов синтеза оптимального управляющего воздействия в реальном времени.

Модуль идентификации по методике приведенной в пятой главе (3.1)–(3.28) позволяет определить модель динамики исследуемого объекта, в том числе и многозонную, рассчитать численные значения параметров дифференциального уравнения, оценить адекватность полученной модели. В случае если погрешность превышает допустимое значение, то имеется возможность произвести описание динамики несколькими видами дифференциальных уравнений (или дифференциальными уравнениями с разными значениями параметров), разбив диапазон на необходимое число зон. Этот модуль, используя методы аппроксимации, исключения ошибок и сглаживания, предлагает вид модели объекта управления на множестве состояний функционирования. Основное отличие от традиционного подхода состоит в том, что нелинейная модель исследуемого процесса представляется комбинацией кусочно-линейных моделей с временами переключений линейных участков (методика описана в главе 3, раздел 3.1). Для сглаживания экспериментальных данных используются метод четвертых разностей, т.е. параболическая аппроксимация каждых пяти соседних значений [109]. Далее вычисления параметров модели производится по формулам (3.14)–(3.28).

Модуль синтеза оптимальных программ служит для получения единой программы объекта динамика управляемого процесса, которого представлена многозонной моделью. Он работает на основании следующей методики стыковки составляющих частей многозонной модели:

– задаются известные массивы реквизитов каждой зоны, предполагаемое время оптимального исследуемого процесса объекта управления, границы управления, время неоптимального исследуемого процесса и границы при неоптимальном управлении;

– задаются времена переключения поддиапазонов фазовых координат, интервалы поиска оптимальных времен переключения и количество зон;

– для каждой зоны на каждом временном интервале производится расчет оптимального управления, траектории изменения фазовых координат и функционал затрат;

– рассчитываются суммы функционалов всех зон, и производится их сравнение;

– в качестве оптимальной управляющей программы выбирается, та у которой сумма функционалов затрат минимальна;

– в качестве оптимальных времен переключений поддиапазонов фазовых координат выбираются те, которые дают минимальную сумму функционалов затрат;

– в случае если рассчитанная на заданном интервале экономия является недостаточной, рекомендуется увеличить время управления.

Этот модуль предназначен для объединения оптимальных программ каждой зоны модели в единую оптимально-управляющую режимом «Пуск» программу. В основе модуля лежат методы динамического программирования и синтезирующих переменных.

Полученная оптимальная программа отрабатывается с использованием модулей имитационного моделирования, включающих в себя прямое моделирование систем на множестве состояний функционирования, и если она удовлетворяет заданным требованиям, то результирующие данные преобразуется в файл, содержащий оптимальные управляющие воздействия, который сохраняется в базе данных.

Объектом управления в рабочей версии ИИУС ТТА может являться любое тепло-технологическое оборудование, осуществляющее процесс нагрева или охлаждения и оборудование, осуществляющее движение рабочих органов. Для получения требуемой информации об объекте предлагается в составе технического обеспечения ИИУС ТТА использовать контроллеры, которые наряду с

функциями управления выполняют измерительные функции, т. е. могут осуществлять постоянный мониторинг состояния объекта управления.

6.2 Информационное и интеллектуальное обеспечение

Основными составляющими ИИУС ТТА, обеспечивающими ее интеллектуальность являются базы данных и знаний. Рассмотрим их создание с учетом особенностей объектов управления, составляющих ТТА и режимов их работы.

6.2.1 База данных

При разработке информационно-управляющей подсистемы особое внимание уделялось проектированию интеллектуальной базы данных, которая в отличие от традиционной обеспечивает выбор из совокупности хранимых данных требуемой информации, не имеющейся там в явном виде. В результате проведения системного анализа предметной области исследования была получена информационная модель ТТА – $M_{\text{ТТА}}$ (2.24) на основании которой проектировалась база данных, предназначенная для хранения и дальнейшего использования декларативной информации. В основе функционирования ИИУС ТТА лежит поиск решения в пространстве состояний, представляемый в виде интегрированного графа метода алгоритмизации синтеза управляющих воздействий см. рис 2.1. Поэтому декларативная информация информационно-управляющей подсистемы может быть, как следствием функционирования модулей страт, так и следствием реализации диалогов ИИУС ТТА с внешней средой с помощью интеллектуального интерфейса. Таким образом, основной целью проектирования базы данных ИИУС ТТА являлась разработка оптимального способа представления, сохранения и управления данными при практической реализации системы.

Проектирование базы данных проводилось с учетом целостности данных, под которой понимается соответствие информационной модели предметной области, содержащейся в базе данных, реальным объектам и их взаимодействиям в

каждый момент времени [117]. База данных создавалась таким образом, чтобы в ней отражалось любое изменение предметной области, значимое для интеллектуальной информационно-управляющей подсистемы. При этом также необходимо сохранение однозначной интерпретации информационной модели в терминах модели предметной области.

К особенностям информационно-управляющей подсистемы следует отнести возможность обслуживания множества однотипных объектов, отличающихся технологическими особенностями (например, количеством камер, типами калориферов и т.д.) и располагаемых в одном или нескольких цехах. Рассмотрим построение базы данных ИИУС на примере СВЛ.

База данных ИИУС СВЛ проектируется согласно морфологической модели объекта (2.24). Таким образом, в базе данных хранится информация: об объекте управления, составляющем СВЛ – NO; о множестве его состояний функционирования – SF; о режимах его работы – RR, целях управления – CU; различных задачах оптимального управления, представляемая кортежем – K; математических моделях объекта управления, соответствующих задачам управления M_h.

Рассмотрим две важные части информационной модели (ER–модели) базы данных ИИУС СВЛ для режимов работы «пуск» и «процесс».

В качестве предметно-значимых сущностей в части ER–модели режима «Пуск» рассматриваются (рис. 6.3): стратегии управления программная, позиционная, комбинированная; технические характеристики; технологические режимы работы; морфологическая и математические модели объектов управления; исходные данные задачи (массив реквизитов); параметры модели; функционал затрат; интенсивности дестабилизирующих факторов; результаты решения задач.

Сушильные установки вальце-ленточного типа являются многокамерными аппаратами, содержащими различные типы тепло-технологического оборудования, работающего в разных режимах. Это многообразие отражается различием моделей: простая модель, мультимодель; а также в сущности массив реквизитов

и описывается множеством задач со своими исходными данными. На объекты управления могут влиять дестабилизирующие факторы, действующие по каналам управления и измерения, интенсивности которых являются атрибутами сущности интенсивность.

Работа модуля имитационного моделирования (ИМ) приводит к сохранению расчетных значений функционала затрат в виде атрибутов сущности функционал затрат.

Исходные данные и результаты работы алгоритмов (синтезируемые значения управления) сохраняются в сущности результаты.

Нормализация данных в разработанной базе данных приводит реляционную модель к третьей нормальной форме – 3НФ [141], где все неключевые атрибуты зависят от всего ключа и не имеют транзитивных зависимостей. В результате нормализации данных информационные модели БД различных режимов имеют следующий вид рисунок 6.3 – фрагмент информационной модели БД режима «пуск» и рисунок 6.4 –фрагмент информационной модели БД режима «пуск».

В качестве предметно-значимых сущностей в части БД режима «процесс» рассматриваются: допустимые диапазоны влажности материала, экспертные оценки, допустимые диапазоны мер доверия, мера доверия, рассчитанная по методу Демпстера-Шафера.

Результаты работы модуля определение мер доверия ($МД$) – расчетные значения мер доверия являются атрибутами сущности Мера доверия, рассчитанная по методу Демпстера-Шафера.

6.2.2 База знаний

Ядром информационно–управляющей подсистемы является база знаний БЗ. Она имеет стратифицированную иерархическую структуру, состоящую из образующих единую систему связанных между собой фреймов. В системе

фреймов могут быть объединены как декларативные, так и процедурные знания, а также организованы принципы присущие объектно-ориентированному подходу, такие как инкапсуляция, наследование и полиморфизм [16]. Фреймы базы знаний имеют слоты, содержащие не только конкретное значение, но также имена процедур, позволяющих вычислять это значение по заданному алгоритму. Некоторые фреймы содержат слоты, заполнителями которых являются правила продукций, используемые для определения конкретного значения. Граф технологии интеллектуализации синтеза управляющих воздействий рабочего прототипа ИИУС СВЛ имеет следующий вид, представленный на рис. 6.5.

Верхний нулевой уровень иерархии содержит фрейм, позволяющий проводить идентификацию состояния функционирования объекта управления. Первый уровень представляют фреймы, позволяющие идентифицировать режим работы объекта управления. Второй уровень содержит фреймы, идентифицирующие цель управления. На третьем уровне располагаются фреймы, предназначенные для структурной и параметрической идентификации модели объекта, пригодной для решения задачи управления. На четвертом уровне находятся фреймы анализа задачи управления. Пятый уровень составляют фреймы определения стратегии реализации управления. На шестом уровне находятся фреймы синтеза алгоритма управления. Седьмой уровень составляют фреймы, содержащие соответствующие имитационные модели, позволяющие проводить проверку синтезированного алгоритма управления [16].

Иерархическая многоуровневая структура позволяет организовать процесс приобретения и использования знаний, а также осуществить интеллектуализацию синтеза решения задачи оптимального управления режимами работы оборудования СВЛ. При этом используются модули ИИУС ТТА, функциональное назначение которых описано в разделе 3.9, а структурная схема взаимодействия представлена на рис.3.6.

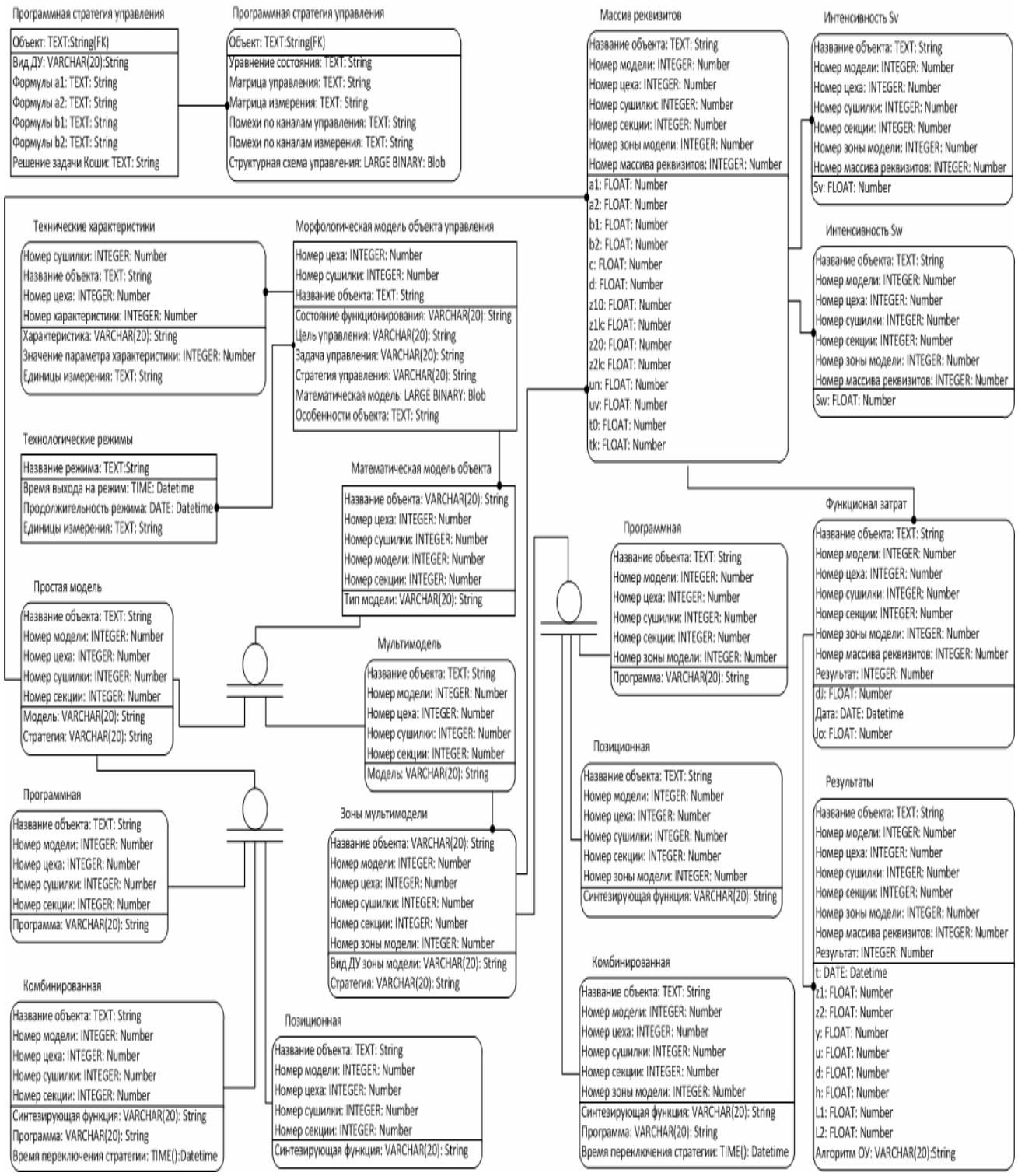


Рисунок 6.3. Фрагмент информационной модели (ER–модель) БД режима «Пуск»

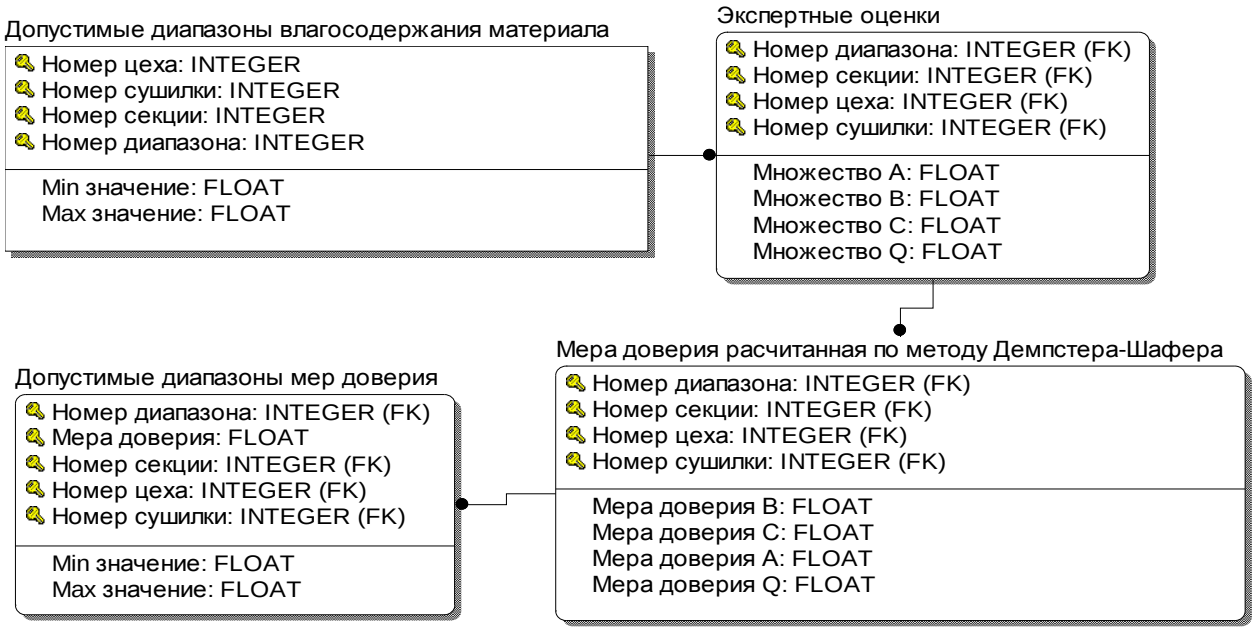


Рисунок 6.4. Фрагмент информационной модели (ER–модель) БД режима «Процесс»

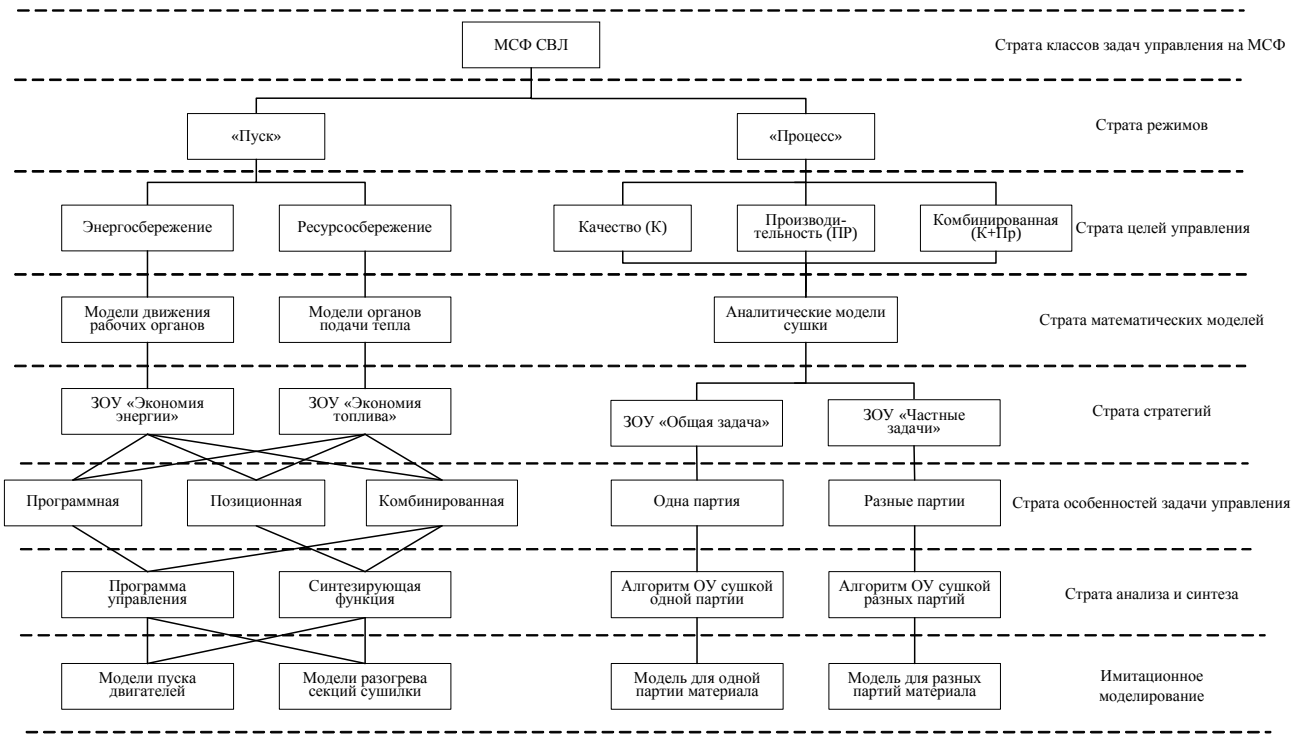


Рисунок 6.5. Граф технологии интеллектуализации синтеза управляющих воздействий рабочего прототипа ИИУС СВЛ

Программно фреймовая база знаний ИИУС состоит из целого набора Различных классов, реализованных с использованием среды визуального программирования Borland Developer Studio 2006 на языке Object Pascal. Статические модели фрагментов структуры БЗ для режимов «Пуск» и «Процесс» изображены на рис. 6.8 и 6.9 соответственно. Эти модели представлены в нотации UML в виде диаграмм классов [16].

Фреймы классов (см. рис.6.6) применяются при работе функциональных программных модулей ИИУС СВЛ работающих в режиме «Пуск».

Модуль идентификации состояния функционирования использует фрейм frMSF, содержащий фрейм frRegimeWork, агрегирующий фрейм frAim, которым пользуется модуль целей управления. Фрейм frAim содержит фрейм frFunc, позволяющий рассчитать значения функционалов затрат энергии и топлива. Модуль анализа в зависимости от объекта управления использует фрейм анализа ОУ (frAnalysisOC), включающий (агрегирующий) фреймы получения условий существования решения ЗОУ (frSolveExists), определения видов функций ОУ (frFunctionOC), границ областей видов функций ОУ (frAreaLimits), расчета параметров функций ОУ (frParamOC).

Фреймом frImitationModelling, включающем фреймы моделирования «белых» (frWhiteNoise) и «цветных» (frColorNoise) шумов, пользуется модуль имитационного моделирования.

Для решения задач управления сушильной установкой модуль синтеза применяется фрейм frSynthesisOC, включающий фреймы:

– математических моделей объектов (frModel);

– алгоритмов управления (frAlg) от которого наследуются фреймы frAlgNoise и frAlgNoNoise;

– множества состояний функционирования (frMSF).

Фрейм массива реквизитов (frMasReqv) агрегирует фрейм моделей (frModel) и связан отношением зависимости с фреймом расчета синтезирующих переменных frSynthVarEng.

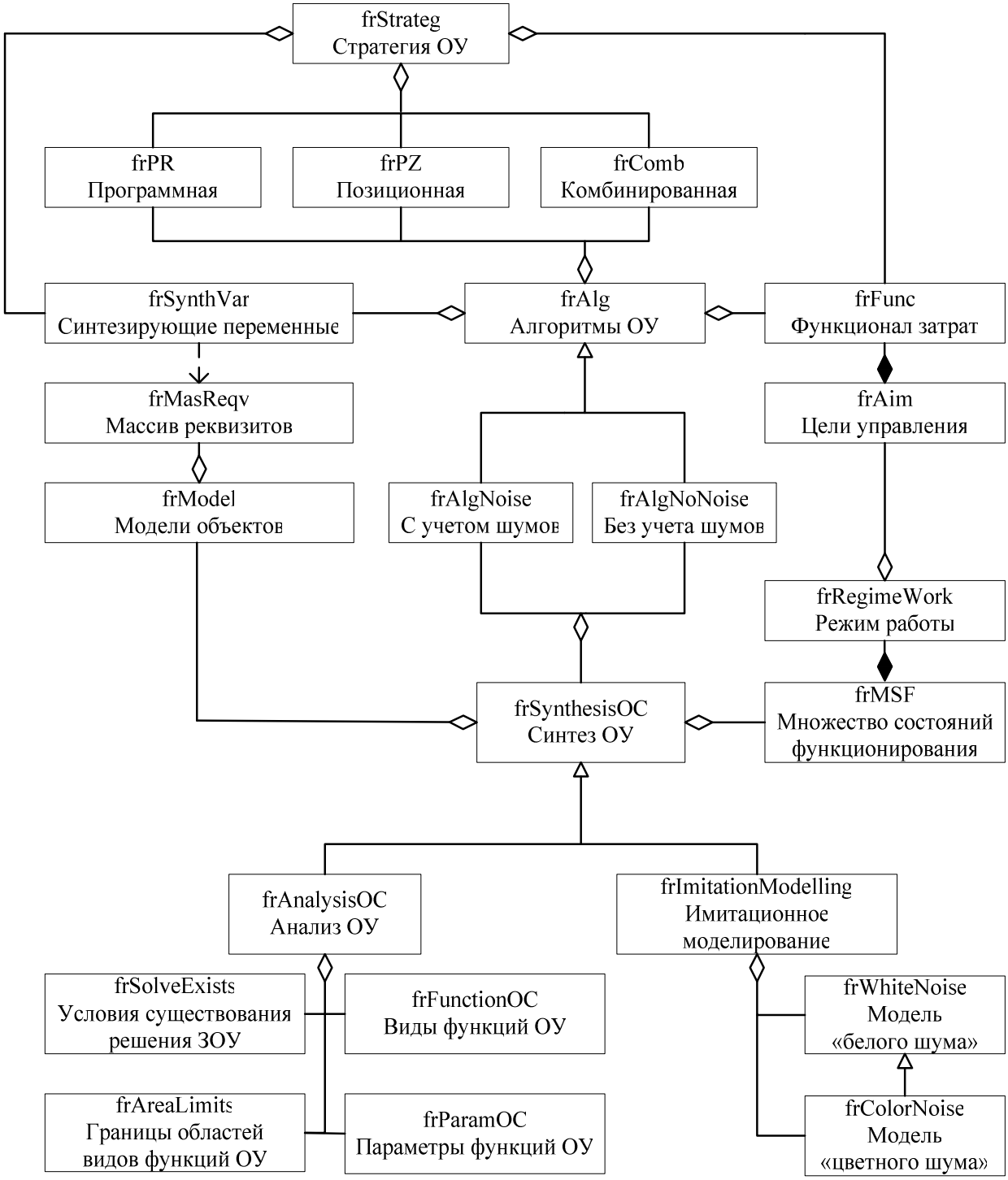


Рисунок 6.6. Фрагмент статической модели фреймовой базы знаний ИИУС СВЛ режима «Пуск»

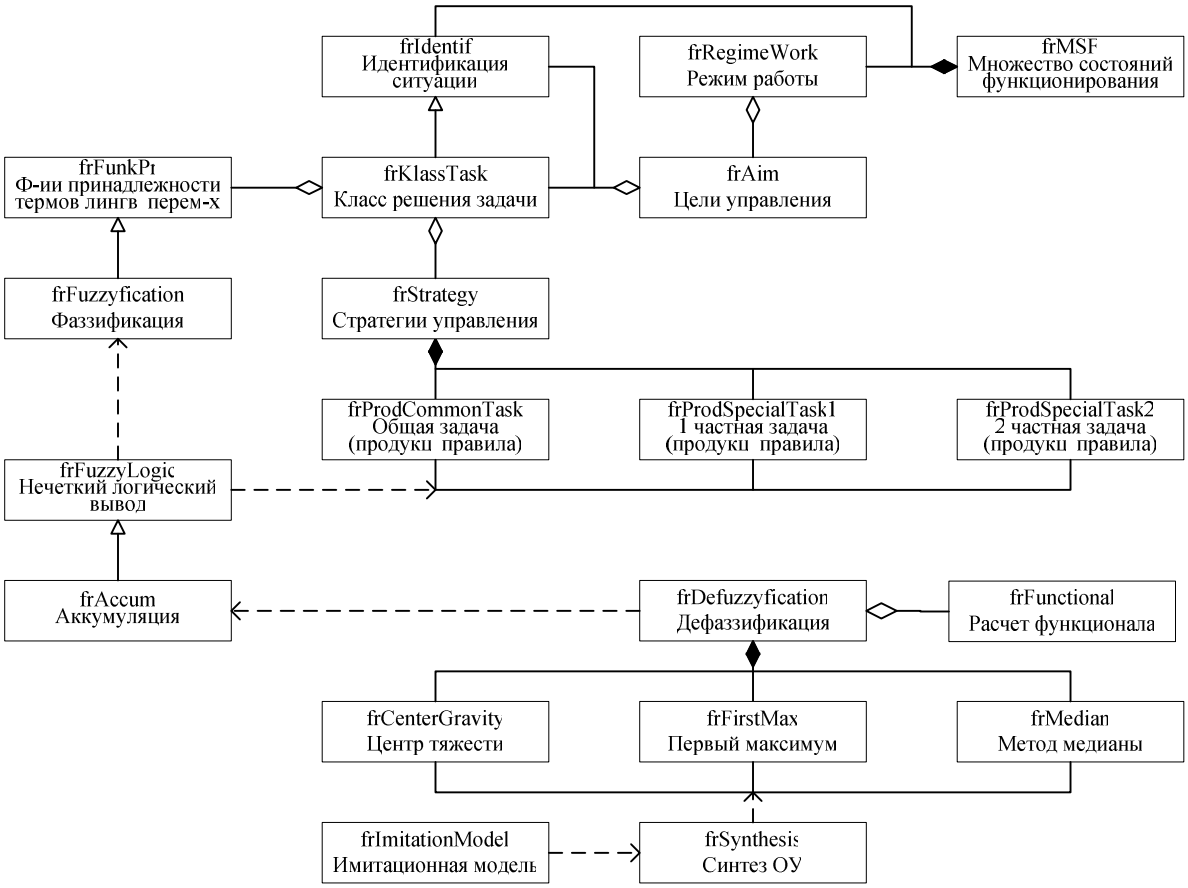


Рисунок 6.7. Фрагмент статической модели базы знаний ИИУС СВЛ режима «Процесс»

Фреймы базы знаний, представленные на рис. 6.7 используются для обеспечения функциональности программных модулей ИИУС СВЛ, работающих в режиме «Процесс» [16].

Модуль идентификации состояния функционирования объекта управления, использует фрейм frMSF, но при этом работают слоты, соответствующие режиму «Процесс». Фрейм frMSF содержит фреймы frRegimeWork и frIdentif, агрегирующий фрейм frAim, которым пользуется модуль целей управления.

Модуль идентификации ситуации использует фрейм frIdentif. Он позволяет в зависимости от состояния функционирования, режима работы выбрать цель управления, согласно которой определяется класс решаемой задачи (frKlassTask). Этот фрейм агрегирует фреймы frStrategy и frFuncPr. Фрейм frStrategy содержит три фрейма стратегий управления frProdCommonTask, frProdSpecialTask1 и frProdSpecialTask2 соответствующие общей задаче управления (2.1)–(2.4) и двум частным задачам (3.35)–(3.42) и (3.43)–(3.51).

Модуль логического вывода, определяющий управляющее воздействие, использует фрейм процедурных знаний frFuzzyLogic связанный отношением зависимости с фреймами frProdCommonTask, frProdSpecialTask1 и frProdSpecialTask2 знания в которых представлены в виде продукционных правил. Фрейм frFuzzyLogic также связан отношением зависимости с фреймом frFuzzyfication, который наследует знания фрейма frFuncPr, связанного отношением зависимости с frPrModel. Фрейм frAccumulation наследует знания фрейма frFuzzyLogic и эти знания использует фрейм frDefuzzification. В состав фрейма frDefuzzyfication входят фреймы, отражающие процедурные знания следующих методов: центр тяжести (frCenterGravity), первый максимум (frFirstMax) и медианы (frMedian). Фрейм frFunctional включен во фрейм frDefuzzyfication.

Модуль синтеза оптимального управления использует фрейм frSynthesis, который использует знания фрейма frDefuzzyfication.

Модуль имитационного моделирования использует фрейм frImitationModel, связанный отношением зависимости с фреймом frSynthesis.

Созданная структура базы знаний обеспечивает оперативную работу модулей, реализующих алгоритмическое обеспечение ИИУС СВЛ, что дает возможность синтезировать оптимальное управление сушильной установкой в реальном времени.

Созданная БЗ ИИУС СВЛ, позволяет решать следующие задачи: энергосберегающий разогрев сушильной установки; энергосберегающий пуск электродвигателей; достижение требуемого качества высушиваемого материала при максимальной производительности процесса сушки в режиме реального времени. Экономия энергоресурсов при оптимальном управлении разогревом сушильной установки составила 6,2% по сравнению с традиционным. В целом же для всей сушильной установки экономия энергоресурсов в динамических режимах составляет 5-10%. Применение ИИУС СВЛ приводит к увеличению до 0,98 вероятности выхода качественной продукции, при этом производительность процессов сушки повышается на 5% [16].

6.3 Функционирование системы на примере ИИУС СВЛ

Алгоритмы ИИУС СВЛ определяются в зависимости от режима работы и соответствующей цели управления. Информационно-управляющая подсистема в режиме «Пуск»» функционирует согласно следующему алгоритму. В результате работы модулей идентификации состояния функционирования (ИСФ) и целей управления (ЦУ) определяются текущее состояние функционирования h объекта управления режим его работы и соответствующая цель управления. Проверяется база данных на наличие подходящего алгоритма управления для текущего состояния функционирования, если он отсутствует то, используя базу знаний, формулируется задача управления, выбирается стратегия, определяется модель объекта управления и вычисляются параметры массива реквизитов задачи управления. В модуле анализа расширенного анализа управления (РАОУ) производится анализ оптимального управления. В результате анализа в модуле синтеза оптимального управления (СОУ) в зависимости от стратегии управления синтезируется алгоритм управления, который может быть представлен в виде программы, синтезирующей функции управления или комбинации программ и синтезирующих функций с соответствующими временами переключения. До первого использования на реальном объекте синтезированный алгоритм проходит пробное тестовое испытание в модуле имитационного моделирования (ИМ). Результаты работы модулей системы, прошедшие проверку в модуле имитационного моделирования сохраняются в базе данных, для дальнейшего использования. Информационно-управляющая подсистема позволяет контролировать и вносить необходимые коррективы в определение оптимального управления объектами посредствам интеллектуального интерфейса системы. Структурная схема информационно-управляющей подсистемы приведена на рис.6.8.

Информационно-управляющая подсистема в режиме «Процесс» работает согласно следующему алгоритму. В модуль идентификации состояния функционирования направляется информация от информационно-измерительной подсистемы ИИУС СВЛ (модуль ИДВ) об оцененной влажности материала в контроли-

руемых камерах, в котором выбирается класс задачи управления, исходя из значений переменной состояния функционирования.

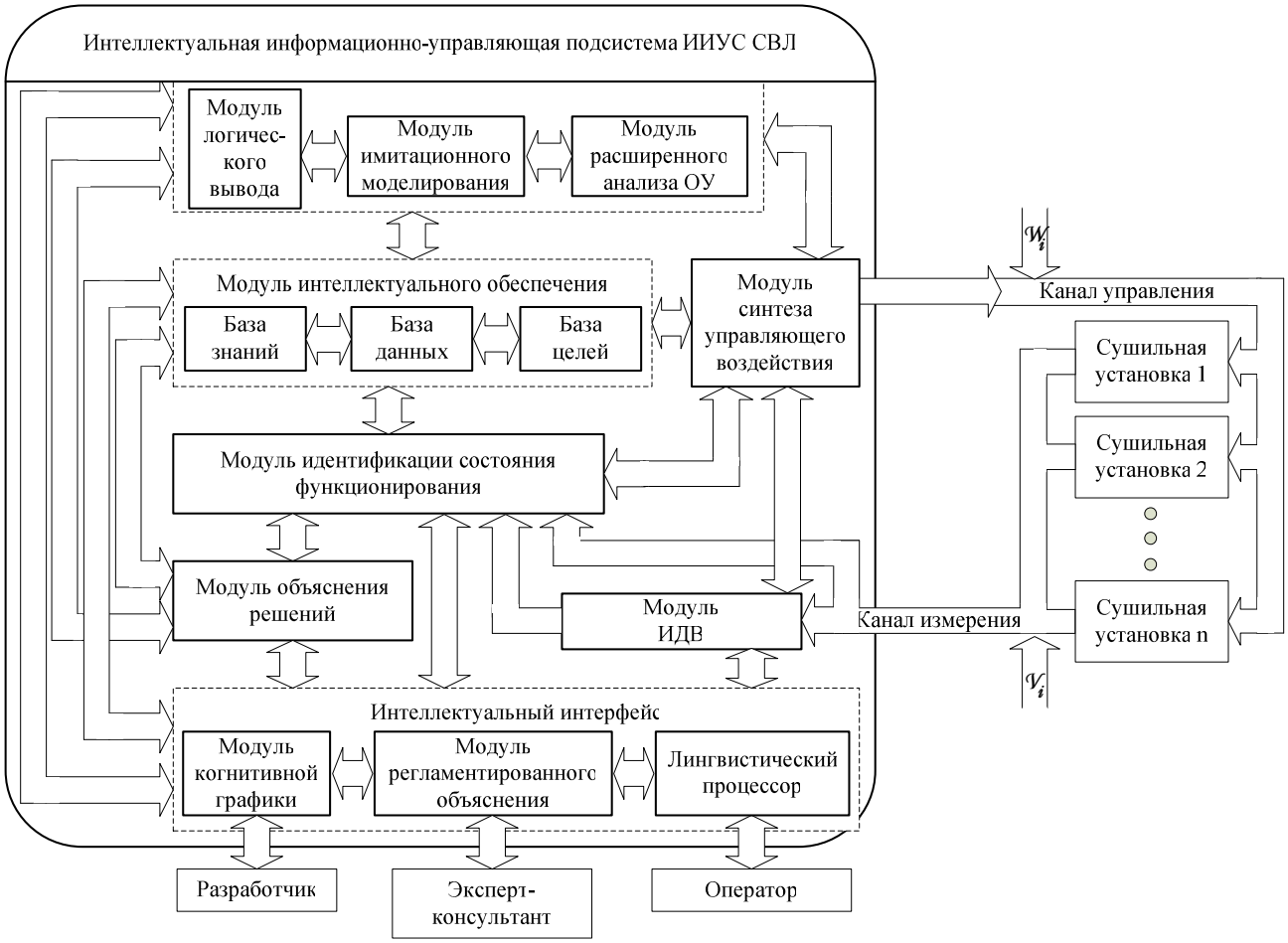


Рисунок 6.8 Структурная схема информационно-управляющей подсистемы

Затем происходит проверка баз данных и знаний на наличие решенной задачи с этими данными. Если решение найдено, то информация передается модулю синтеза управляющего воздействия. Иначе, для классов задач $K_{n,n+1}$, $K_{\text{о}}$ с использованием баз данных и знаний по методу Демпстера-Шафера производится расчет меры доверия к достижению заданного технологическими требованиями качества материала на выходе СВЛ. При этом вся информация записывается в базу данных, и начинает работать модуль логического вывода, в котором для данной задачи, находится класс ситуаций, отражающий специфику алгоритма управления (см. 5. 4). В том случае, когда все элементы множества $h(t)$ входят в класс K_0, смена управления не происходит, т.е. оно сохраняет свое значение с предыдущего временного интервала. В том случае, когда все элементы множества $h(t)$

входят в класс $K_{\text{пр}}$, синтезируется управляющее воздействие, обеспечивающее повышение производительности процесса при наличии ограничения на качество выпускаемой продукции. В том случае, когда все или некоторые из элементов множества $h(t)$ входят в классы K_i, K_{i+1} или $K_{i,\,i+1}$, синтезируются управляющие воздействия, с учетом измерений в i-ой и $(i+1)$-ой камерах СВЛ или в обоих камерах. Совокупность нечетких предикатных правил выделенных классов имеет вид для:

$K_{\text{пр}}$ –if $\langle \Phi_i = \Phi_i^{\text{Л}} \rangle$ and $\langle \Phi_{i+1} = \Phi_{i+1}^{\text{Л}} \rangle$ and $\langle \text{M}_k^{\text{к}} = \text{M}^{\text{Л}} \rangle$, then $\langle U^{\text{сл}} = (U^{\text{сл}})^{\text{Л}} \rangle$; K_i – if $\langle \Phi_i = \Phi_i^{\text{Л}} \rangle$, then $\langle U^{\text{сл}} = (U^{\text{сл}})^{\text{Л}} \rangle$; K_{i+1} – if $\langle \Phi_{i+1} = \Phi_{i+1}^{\text{Л}} \rangle$ and $\langle \text{M}_k^{\text{к}} = \text{M}^{\text{Л}} \rangle$, then $\langle U^{\text{сл}} = (U^{\text{сл}})^{\text{Л}} \rangle$; $K_{i,\,i+1}$ – if $\langle \Phi_i = \Phi_i^{\text{Л}} \rangle$ and $\langle \Phi_{i+1} = \Phi_{i+1}^{\text{Л}} \rangle$ and $\langle \text{M}_k^{\text{к}} = \text{M}^{\text{Л}} \rangle$, then $\langle U^{\text{сл}} = (U^{\text{сл}})^{\text{Л}} \rangle$;

здесь индекс Л обозначает значение лингвистической переменной из соответствующего классам множества. Модуль логического вывода функционирует, используя базу знаний и базу данных. При этом происходит логический вывод:

1. Фаззификация, т.е. определение для каждого правила значений функций термов входных и выходных лингвистических переменных.
2. Нечеткий вывод, т.е. приведение к некоторому множеству, с нечеткими границами, которое для каждого правила назначается переменной вывода. Здесь в логическом выводе используется операция поиска минимума.
3. Агрегация, т.е. объединение множеств с нечеткими границами вместе, и формирование нового нечеткого множества. При подобном объединении используется операция поиска максимума.
4. Дефаззификация, т.е. возврат к четкости, состоящий в преобразовании объединенного нечеткого множества выводов в число. В качестве методов возврата к четкости используются метод центра тяжести, метод медианы и метод первого максимума.

Полученные значения возможных управлений рассматриваемой задачи передаются в модуль регламентированного объяснения решения и записываются

в базу данных. Затем эти управления направляются в модуль синтеза управляющего воздействия, где происходит минимизация функционала, в результате чего вычисляют управляющее воздействие сушильной установкой вальцеленточного типа.

Основой информационно-измерительной подсистемы ИИУС СВЛ, которую также будем называть, системой мониторинга влажности материала (описание приведено в главе 5) являются интеллектуальные датчики влажности (ИДВ), позволяющие проводить косвенные измерения влажности материала непосредственно в процессе сушки в реальном времени [44]. На стадии технического проектирования ИИУС ТТА особое внимание уделяется созданию особенностям технического обеспечения системы.

6.4 Особенности технического обеспечения и техническая реализация интеллектуального датчика влажности

Для выбора технических средств, проводится анализ существующих моделей промышленных контроллеров и измерительно-вычислительных средств, используемых в автоматизированных системах управления. По критериям (2.41)–(2.52), решая задачу структурного синтеза, определяется оптимальный состав множества для обеих подсистем.

При создании промышленной микропроцессорной системы, функционирующей в реальном масштабе времени на объекте управления, необходимо выбирать подходящие технические средства, способные решать задачи управления процессами нагрева.

Применяемые в микропроцессорных системах управления измерительные, вычислительные, накопительные, исполнительные, управляющие устройства и другое оборудование нижнего уровня, используемое непосредственно на исследуемом объекте, должно работать в реальном масштабе времени, с учетом скоростей протекания событий в самом объекте. Эти устройства должны адек-

ватно воспринимать и своевременно реагировать на большое количество аналоговых, цифровых и дискретных сигналов, а также рассчитывать и реализовывать синтезированные управляющие воздействия. Кроме того. эти устройства должны удовлетворять достаточно жестким требованиям на скорость их реакции на внешние воздействия, на скорость синтеза соответствующих управляющих воздействий и на возможность работы в различных режимах функционирования объекта управления. В виду того, что отказ устройств, входящих в микропроцессорную систему управления, может привести к отказу довольно дорогого оборудования, они должны также удовлетворять требованию высокой надежности.

Современные вычислительные элементы, платы, устройства памяти и т.д. обладают достаточно высокой надежностью. Однако, показатели надежности программных и технических средств микропроцессорной системы управления не возможно определить достаточно точно с использованием широко применяемого критерия “число часов наработки на отказ” [256]. В связи с этим, показатели надежности микропроцессорных устройств оценивают по ряду косвенных показателей:

– качество программных тестов диагностики и определения неисправностей в элементах микропроцессорной системы;

– длительность работы устройств и, в случае необходимости, корректное завершение их работы при наличии критических перепадов напряжения и полного отсутствия питания;

– обеспечение способности сохранения управления при длительном отсутствии напряжения в питающей сети.

Выбор управляющего устройства (УУ), применяемого для реализации синтезированных управляющих воздействий, производится на основе анализа их технических характеристик и ценовых показателей. Промышленные контроллеры, являющиеся основными элементами в системе управления, значительно отличаются по цене, качеству и реализуемым функциям у разных производителей. Основными показателями, характеризующими производимый выбор контроллера, являются: тип, рабочая частота и ядерность процессора; разрядность шины;

наличие и объем постоянной и энергонезависимой оперативной памяти; возможности связи по локальной и глобальной сетям; достаточное число входов-выходов (аналоговых, дискретных, импульсных) для организации функций системы.

При решении задач построения системы на этапе технического проектирования (см. раздел 2.7) и выборе технических средств требуется минимизировать суммарные критерии (2.50), а также сделать удобным и простым использование создаваемого программно-технического комплекса.

Множество технических средств ИИУС ТТА может содержать следующие элементы: микропроцессорные устройства; различные датчики и устройства измерения, обработки, сохранения, отображения и передачи информации; а также необходимая оргтехника и другие.

Техническая реализация интеллектуального датчика влажности

Основой интеллектуального датчика влажности является микроконтроллер MSP430 фирмы Texas Instruments, содержащий 16-разрядный RISC-процессор (Reduced Instruction Set Computer), имеющий архитектуру с сокращенным набором команд и возможность оперировать как с байтом, так и со словом.

Микроконтроллер MSP430 имеет 27 основных и 24 дополнительных инструкций, что дает возможность генерировать команды более простым способом, при этом команды обращения к аккумулятору, памяти, периферийным устройствам отсутствуют, что приводит к значительному повышению эффективности функционирования процессора.

Процессор содержит трехступенчатый конвейер инструкций, 16-разрядное арифметико-логическое устройство (ALU), 16 внутренних регистров, из которых четыре являются счетчиком команд, указателем стека (SP), регистром состояния (SR) и генератором констант (CG). Здесь счетчик команд фиксирует текущий адрес выполняемой команды; указатель стека сохраняет информацию о стековой памяти; регистр состояния хранит результаты выполнения команд. Оставшиеся

регистры используются пользователем. ALU способно выполнять простейшие арифметические операции сложения и вычитания, операцию сравнения, и логические операции AND, OR, XOR.

Модуль тактирования может содержать следующие источники тактовых импульсов:

− LFXT1CLK – низкочастотный / высокочастотный осциллятор, использующийся с низкочастотными часовыми кристаллами на 32768 Гц, либо стандартными кристаллами, либо резонаторами в диапазоне от 450 кГц до 8 МГц.

− XT2CLK – высокочастотный осциллятор, использующийся со стандартными кристаллами, резонаторами или внешними источниками таких сигналов в диапазоне от 450 кГц до 8 МГц.

− DCOCLK – встроенный осциллятор с цифровым управлением (DCO) с характеристикой RC-типа.

При разработке ИДВ был использован микроконтроллер MSP430F169, имеющий 2 килобайта оперативной памяти, 60 килобайт flash-памяти, 48 портов ввода/вывода, встроенный АЦП и ЦАП, два USART.

MSP430F169 тактируется встроенным осциллятором (RC-типа) с максимальной частотой примерно 10 МГц. Для формирования задержек был использован внешний кварц 32768 Гц. При задержках, а также после реализации программы вычисления микроконтроллер переходит в энергосберегающий режим LPM3.

С целью реализации алгоритма оценки влажности пастообразного материала требуется сохранять и при необходимости оперативно менять такие данные, как величины коэффициентов нормализации и денормализации, сдвиги и веса нейронной сети. Все эти значения сохраняются в Flash-памяти.

В качестве устройства хранения данных выбрана память DataFlash AT45DB041 фирмы Atmel. Весь объем памяти в 4 Мбит разбит на 2048 страниц по 264 байта. Помимо общей памяти, используются два SRAM буфера данных, размером 256 байт. Эти буферы позволяют принимать данные в различных режимах: перепрограммирования основной памяти, считывания, записи непрерыв-

ных потоков данных. Микросхема применяет интерфейс SPI для последовательного обращения к данным, который позволяет увеличить отказоустойчивость системы, минимизировать коммутационные шумы, уменьшить размеры корпуса и количество активных выводов. Преимущества применяемого устройства памяти заключаются в высокой плотности размещения, малом количестве выводов, достаточно низком напряжении питания, сравнительно малом энергопотреблении. Микросхема памяти работает при тактовых частотах до 20МГц и при типовом токе в режиме активного чтения 4 мА. Устройство AT45DB041 обладает такими характеристиками, как

- однополярное напряжение питания – 2,5-3,6 В;
- совместимость с последовательным периферийным интерфейсом типа SPI;
- максимальная тактовая частота 20 МГц;
- постраничный режим программирования;
- низкое энергопотребление: типичный ток 4 мА в режиме активного чтения и 2 мкА – в режиме ожидания;
- аппаратная функция защиты данных;
- входы сигналов SI, SCK, CS (активный низкий), RESET (активный низкий) и WP (активный низкий) устойчивы к логическим уровням 5 В;
- коммерческий и индустриальный диапазоны температур.

Рассчитанная оценка влажности отображается на экране интеллектуального датчика, посредством красных семисегментных индикаторов фирмы Kingbright, текущая влажность материала выводится на SC08-11SRWA, требуемая влажность – на SC08-11SRWA.

Применяемые индикаторы обладают следующими техническими характеристиками:

- максимальное прямое напряжение 2,5 В (при токе 20 мА);
- максимальный прямой ток 30 мА;
- максимальное обратное напряжение 5 В;

− обратный ток 10 мкА (при напряжении 5В);

− мощность рассеивания 75 мВт;

− максимальный импульсный ток 155 мА.

С целью согласования работы микроконтроллера и индикаторов применена микросхема фирмы Motorola MC14489B, содержащая встроенные декодер кода и статическую память, для сохранения отображаемых значений. Требуется всего один резистор для питающей цепи всех сегментов LED. Данная микросхема содержит последовательный SPI интерфейс и ограниченную скорость увеличения напряжения драйверов сегментов, что приводит к понижению электромагнитного излучения.

Применяемая микросхема обладает следующими характеристиками:

- последовательный SPI интерфейс – 4 МГц;
- общий катод управления светодиодными индикаторами;
- напряжение питания – 4,5-5,5 В;
- очистка дисплея при подаче питания;
- 5-ти разрядное управление.

Вывод информации о текущей и информации о требуемой влажности осуществляется с помощью 3-х разрядных индикаторов, причем ещё один разряд необходим для вывода номера камеры. Всего требуется 7 разрядов. Работы всех индикаторов обеспечивают две микросхемы MC14489B с последовательным соединением. Одна микросхема обеспечивает отображение номера камеры и требуемой влажности материала в ней, вторая обеспечивает отображение рассчитанного по аналитической модели влажности материала в камере.

Для получения численных значений температуры и влажности воздуха в СВЛ и цехе используются цифровые интегральные модули SHT15 фирмы Sensirion. Модуль включает в себя емкостный полимерный датчик влажности и датчик температуры. Оба элемента работают с 14 битным аналого-цифровым преобразователем и последовательным интерфейсом I2C, расположенными в этом

же чипе. Такая конструкция обеспечивает очень высокое качество сигнала, малое время отклика и устойчивость к внешним электромагнитным помехам.

Он имеет следующие параметры:

- диапазон измерения влажности – 0-100% RH;
- погрешность измерения влажности ±2,0%;
- время отклика 4с;
- разрешение при измерении влажности 0,03%RH;
- диапазон измерения температуры –40 – 123°С;
- погрешность измерения температуры 0,5% при 25°С;
- разрешение при измерении температуры ±0,01°С;
- напряжение питания 2,4-5,5 В;
- потребляемый ток (режим измерения) 0,5 мА;
- потребляемый ток (режим ожидания) 0,3 мА.

Абсолютная погрешность измерения влажности и температуры датчиками представлена в разделе 6.4.

Для защиты датчиков SHT15 от пыли фирма используются специальные защитные фильтры SF1 Filter Cap [81] со степенью защиты IP67. Фильтр изготовлен из полипропилена. Пористость фильтра составляет 1,5 мкм. При использовании данного фильтра происходит замедление реакции датчика на изменение влажности воздуха, она составляет около 30 секунд.

Датчик имеет последовательный 2-х проводной интерфейс. Схема соединения с микроконтроллером изображена на рисунке 6.9.

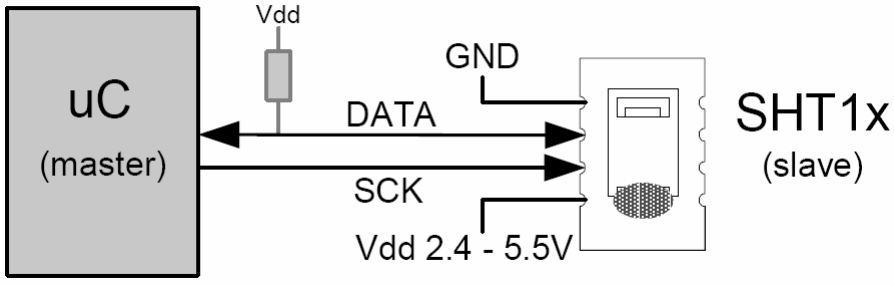


Рисунок 6.9 Схема соединения с микроконтроллером

Для измерения влажности материала в одной СВЛ используется 3 датчика типа SHT15: два датчика в секциях с максимальным влагосъемом и один датчик – вне СВЛ.

Используемые аппаратные средства обеспечивают необходимую точность работы интеллектуального датчика влажности материала.

6.5 Метрологический анализ системы

Погрешность расчета управляющего воздействия – максимальная разность между значениями, рассчитанными в микропроцессорном устройстве управления (МПУУ), тестируемой программой и соответствующими значениями эталонных данных, полученных для тех же моментов времени. Эталонные данные получают в результате работы модулей имитационного моделирования, формирующих тестовый набор данных.

Погрешности, возникающие при получении численного решения задачи оптимального управления, можно разделить на две группы:

– погрешности округления,

– погрешности метода.

Ошибки округления могут порождаться ограниченной разрядной сеткой, используемой для представления чисел в МПУУ. Анализ ошибок этого типа состоит из двух частей.

Во-первых, производится определение точности представления чисел в МПУУ и погрешности округления, которая зависит от округляемого числа, разрядности МПУУ и формы представления чисел. Максимальная погрешность округления определяется половиной единицы последнего числового разряда. Поэтому, чем больше значащих цифр оставлено после плавающей точки, тем меньше погрешность. Максимальное количество значащих цифр зависит от конечности разрядной сетки.

Одним из основных источников вычислительных погрешностей является приближенное представление чисел в компьютере. При решении вычислительных задач обычно используют представление чисел в форме с плавающей точкой. Число представляется в виде экспоненциальной записи т.е. произведения мантиссы на основание показательной функции в степени порядка.

Все персональные компьютеры и большинство рабочих станций поддерживают IEEE-стандарт двоичной арифметики. Стандарт предусматривает два типа чисел с плавающей точкой: числа обычной и двойной точности. Наиболее часто используется стандарт IEEE 754 – двоичный стандарт в нем одинарная точность предполагает порядок 24, а двойная 53. Также существует стандарт IEEE 854, где используются числа, как с двоичным, так и с десятичным основанием.

Во-вторых, производится определение и оценка погрешности, вносимой вычислительным методом. К таким погрешностям относятся ошибки, в которые трансформируются ошибки округления в результате выполнения действий, предписываемых конкретным алгоритмом, а также ошибки, возникающие в самом алгоритме в результате, например, применяемых в нем аппроксимаций, усечения рядов и т. п.

Применяемые в ИИУС ТТА математические методы позволяют производить вычисления элементарных функций, например, экспоненты разложением в ряд Тейлора, с относительной погрешностью не выше $0.5 \cdot 10^{-4}$.

Погрешности метода возникают в задачах, для решения которых используются методы, ориентированные на получение приближенных решений, например, численные методы решения нелинейных алгебраических уравнений, интегрирование дифференциальных уравнений и т.д. В ИИУС ТТА предлагается использовать методы искусственного интеллекта, позволяющие свести эти погрешности к минимуму.

При тестировании программного обеспечения ИИУС ТТА полученное значение максимальной ошибки расчета управляющего воздействия сравнивается с максимальной допустимой погрешностью, зависящей от области примене-

ния управляющей программы. Значение максимальной допустимой погрешности вычисления задается в нормативно-технической документации на испытываемое ПО.

Погрешность, интервала времени синтеза значений управления, определяется степенью сложности алгоритма тестируемой программы. Усложнение алгоритма расчета управляющего воздействия приводит к увеличению числа операций, необходимых для выполнения контроллером за определенный промежуток времени. Превышение времени расчета управляющего воздействия приводит к задержкам в ИИУС ТТА, и отклонениям в состоянии управляемого объекта от рассчитанного режима его функционирования. Определение времени расчета управляющего воздействия и не допущение его превышения важно в программах, реализующих стратегии, базирующиеся на позиционной стратегии управления и отличающиеся большим числом вычислений, выполняемых за небольшой интервал времени.

При тестировании ПО ИИУС ТТА точность функционирования в реальном режиме времени определяется разностью между действительно затраченным на решение поставленной задачи ИИУС ТТА и заданным временем. Поэтому при выборе используемых в ИИУС ТТА технических средств реализующих ОУ, вводятся ограничения на их быстродействие.

Надежность функционирования – способность ПО выполнять заданные функции при любых исходных данных из множества допустимых значений. Невыполнение этого требования проявляется в невозможности решения ЗОУ или в неправильном ее решении из-за неточности вычисления значений синтезирующих переменных, границ областей (видов) оптимального управления, погрешности сравнения величин и т.д.

Надежность функционирования следует оценивать в областях, соответствующих критическим значениям параметров. Исходные данные для этих областей определяются в ИИУС ТТА путем решения обратной задачи и образуют множество, для которого решение ЗОУ динамическими режимами лежит на гра-

нице существования или на границе раздела двух зон, характеризующихся различными видами функции оптимального управления.

Тестирование управляющей программы при всех исходных данных сформированного множества, соответствующего критическим значениям параметров, позволяет оценить надежность функционирования ПО. Требования надежности считаются выполненными, если при любых исходных данных множества управляющая программа производит расчет управления с погрешностью, не превышающей максимально допустимое значение.

Одной из важных задач метрологического обеспечения ИИУС ТТА является оценка максимальной систематической погрешности интеллектуального датчика влажности.

Интеллектуальный датчик влажности представляет собой информационно-измерительную подсистему, имеющую множество измерительных каналов. Мощность множества зависит от количества контролируемых камер, в которые устанавливаются первичные преобразователи. Рассмотрим интеллектуальный датчик влажности двух контролируемых камер (см. рис. 5.12).

В этом случае в информационно-измерительной системе имеются.

– Три датчика влажности и температуры. Каждый датчик использует один измерительный канал для поочередной передачи информативных параметров измеряемых величин. Они являются универсальными первичными преобразователями.

– Четыре первичных преобразователя для измерения степени открытия шиберов (2 преобразователя) и воздухозаборных окон (2 преобразователя).

– Датчик скорости движения пластинчатого конвейера (1 преобразователь).

– Первичный преобразователь механического воздействия информирующего о наличии ворошителя в функционально связанный логический уровень для последующей обработки микроконтроллером.

– Первичный преобразователь включения/выключения вытяжного вентилятора.

Каждый преобразователь использует собственный измерительный канал для передачи информативного параметра к другому техническому устройству – микроконтроллеру. Таким образом, информационно-измерительная подсистема имеет 10 измерительных каналов, три из которых универсальные.

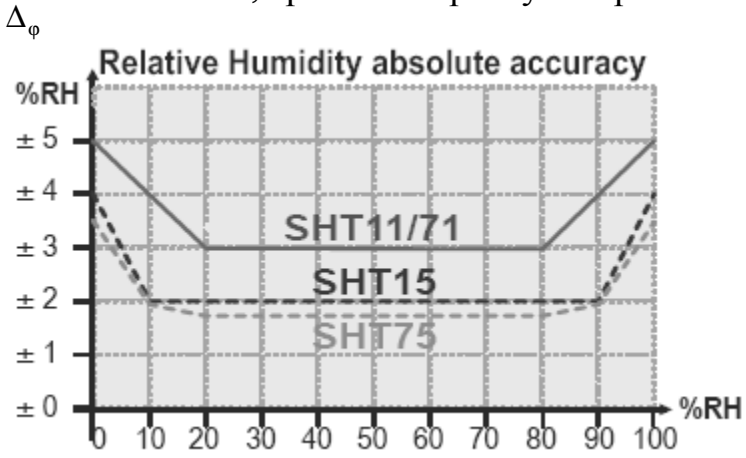


Рисунок 6.10 Графики зависимостей абсолютной погрешности относительной влажности от диапазона измерения

Произведем оценку погрешностей компонентов. В информационно-измерительной подсистеме применяется датчик влажности и температуры фирмы Sensirion [227] предназначенный для измерения относительной влажности и температуры. Он калиброван и имеет цифровой выход. Для оценки погрешности измеряемых физических величин (температура и влажность) будем использовать данные, предоставляемые фирмой для различных модификаций датчиков и представленные на рис. 6.10 и 6.11.

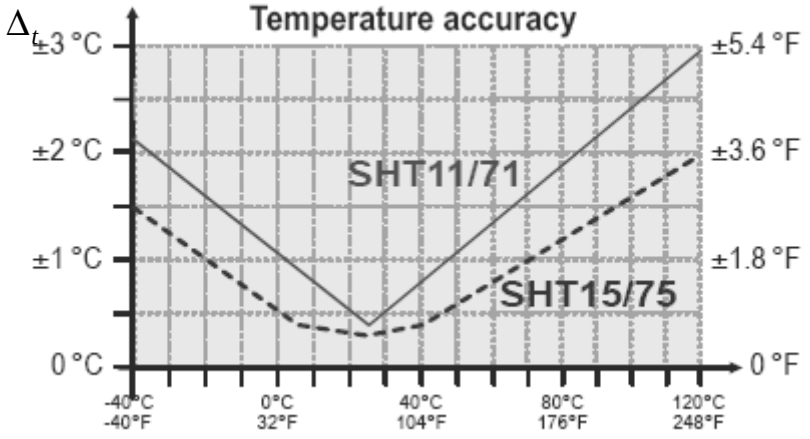


Рисунок 6.11 Графики зависимостей абсолютной погрешности температуры от диапазона измерения

На рис. 6.10 и 6.11 приводятся графики зависимостей абсолютной погрешности, выраженной в единицах измеряемой величины. Абсолютная погрешность имеет нормальное распределение. Для оценки точности измерений будем оценивать приведенную погрешность [221]. Оценим максимальные приведенные погрешности датчика SHT 15 при измерении относительной влажности и температуры.

Для оценки приведенной погрешности относительной влажности за верхний предел нормирующего значения измерений относительной влажности примем Q_N^{φ}=100%RH, за абсолютную погрешность Δ_{φ} – максимальное значение отклонения измеряемой величины, $\Delta_{\varphi} = \pm 4\% RH$, тогда:

$$\gamma_{\varphi} = \frac{\Delta_{\varphi}}{Q_N^{\varphi}} = \frac{4}{100} = 0{,}04 \text{ или } 4\%.$$

Для оценки приведенной погрешности измерений температуры Q_N^t примем арифметическую сумму двух верхних значений диапазона (если нулевая отметка находится внутри диапазона измерений), тогда Q_N^t=120+(-40)=160ºС, за абсолютную погрешность Δ_t примем максимальное значение отклонения измеряемой величины, $\Delta_t = \pm 2^{\circ} C$, тогда:

$$\gamma_t = \frac{\Delta_t}{Q_N^t} = \frac{2}{160} = 0{,}0125 \text{ или } 1{,}25\%$$

Систематической погрешностью определения степени открытия шиберов, воздухозаборных окон и скорости движения ленточного транспортера в информационно-измерительной подсистеме можно пренебречь. Потому, что в процессе реальной эксплуатации интеллектуального датчика влажности эта погрешность может быть устранена, как механической, так и электрической юстировкой на этапе пусконаладочных работ. При работе в лабораторных условиях используется блок имитационной модели сушильной установки, в котором считаем данную погрешность устраненной.

Измерительные сигналы с первичных преобразователей поступают на входные аналого-цифровые порты микроконтроллера. Точность аналого-

цифрового преобразования зависит от погрешности преобразования используемого АЦП. Для преобразования значений измеряемых величин применяется интегрированный 12-ти разрядный АЦП быстрого преобразования. В технической документации на используемый микроконтроллер MSP430 указывается суммарная некомпенсированная погрешность в единицах младшего значащего разряда (МЗР), так для данной модели микроконтроллера номинальная суммарная некомпенсированная погрешность составляет ±2 МЗР, максимальная – ±5 МЗР. Погрешность квантования не коррелированна с входным сигналом и имеет равномерное распределение. Погрешность в 1 МЗР от полного диапазона сигнала определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{АЦП}} = \frac{1}{2^N} \cdot 100\,\%, \qquad (6.1)$$

где N – разрядность АЦП.

Определим погрешность в 1 МРЗ при N=12 по формуле (6.1):

$$\varepsilon_{\text{АЦП}} = \frac{1}{2^{12}} \cdot 100\,\% = \frac{1}{4096} \cdot 100\,\% = 0{,}0244\,\%$$

Соответственно максимальная некомпенсированная погрешность для данного интегрированного АЦП от полного диапазона сигнала составит 0,1%.

Нахождение границ производится с систематической погрешностью, оцениваемой по некоторым составляющим, которые принято называть элементарными систематическими погрешностями.

Множество различных реализаций каждой из этих элементарных погрешностей определяется множеством способов возможных измерений данной величины. Отсюда элементарные систематические погрешности можно считать случайными величинами и обрабатывать с помощью методов математической статистики. В тоже время, их функции распределения, обычно, неизвестны, и поэтому для статистической обработки их вид выбирается с учетом известных данных об элементарной систематической погрешности. Следуя принципу оценивания погрешностей сверху, из всех возможных их распределений всякий раз следует выбирать наихудшее, чтобы не вносить существенной ошибки в полу-

чаемые результаты. Полученная таким образом оценка погрешности отражает неопределенность результата [221].

На выбор закона распределения влияют следующие соображения:

– следует выбирать равномерное распределение, когда известна оценка границ погрешности $\pm\delta_{сист\,i}$;

– следует выбирать нормальное распределение, когда известна оценка среднеквадратического отклонения.

Применение этих соображений дает возможность суммировать статистически элементарные систематические погрешности [221].

При равномерном законе распределения элементарных систематических погрешностей их сумма равна:

$$\delta_{сист} = \sum_{i=1}^{n} \delta_{сист\,i} \quad , \tag{6.2}$$

где $\delta_{сист\,i}$ – границы *i*-й элементарной систематической погрешности;

Погрешность оценки влажности пастообразного материла в двух камерах, будет складываться из следующих составляющих:

– погрешностей определения температуры и влажности в помещении (цехе);

– погрешностей определения температуры и влажности в камере;

– погрешностей преобразования информационных сигналов от датчиков скорости конвейера, открытия шиберов, открытия воздухозаборных окон при преобразовании АЦП микроконтроллера.

Тогда по формуле (6.2) с учетом определенных приведенных погрешностей результат измерения влажности будет иметь максимальную систематическую постоянную погрешность каждой из составляющих проведения измерения:

$$\delta_{сист} = \delta_{\text{t в помещении}} + \delta_{\text{t в секции}} + \delta_{\text{RH впомещении}} + \delta_{\text{RH в секции}} + \delta_{\text{АЦП скорости конв}} +$$
$$+ \delta_{\text{АЦП отк…шиберов}} + \delta_{\text{АЦП откр. воздух. окон}} = 1{,}25 + 1{,}25 + 4 + 4 + 0{,}1 + 0{,}1 + 0{,}1 = 10{,}8\%.$$

Таким образом, максимальная систематическая погрешность информационно-измерительной подсистемы при оценке влажности составляет ±10,8%.

С учетом работы датчиков SHT 15 в рабочих диапазонах влажности от 80% до 10% величина систематической погрешности снижается и имеет значение 6,8%.

С целью уменьшения влияния случайных погрешностей проведем обработку результатов измерения. Рассмотрим выборку статистических измерений влажности материала φ={43,5; 41,7; 44,2; 46,6; 44,5; 41,7; 41,1; 42,1; 42,2; 41,9; 43,1; 43,6; 43,8; 43,6; 40,1; 43,4; 42,9; 42,3; 44,3; 44,5}, при которых двадцатикратные наблюдения выполнялись при одинаковых технологических условиях.

Обработка результатов измерений проводится с использованием известного алгоритма [232]:

Рассчитываются значения математического ожидания $m_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} \varphi_i}{n} = 43{,}054$, оценки случайной погрешности среднего арифметического значения результата измерений $\tilde{\sigma}_\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\varphi_i - m_x)^2}{n(n-1)}} = 6{,}568$.

1. Задаются заданным уровнем доверительной вероятности, числом степеней свободы и определяют значение коэффициента Стьюдента. Здесь коэффициент Стьюдента t_ε=3,8834 при числе степеней свободы 20 и доверительной вероятностью равной 0,99.

2. Рассчитывается доверительный интервал $m_\varphi - t_\varepsilon \tilde{\sigma}_\varphi \le \varphi \le m_\varphi + t_\varepsilon \tilde{\sigma}_\varphi$, определяющий возможные границы изменения результатов эксперимента с учетом случайной погрешности. В данном случае доверительный интервал $41{,}78 \le \varphi \le 44{,}33$.

3. Рассчитывается значение относительной случайной погрешности по формуле $\delta_{сл} = \frac{t_\varepsilon \tilde{\sigma}_x}{m_x} = 0{,}02958$.

4. Полная погрешность прямого эксперимента с учетом систематической и случайной составляющих определяется по формуле $\delta_{\Sigma} = \pm\sqrt{\delta_{сл}{}^2 + \delta_{сист}^2}$ =6,800064.

Из проведенных вычислений следует вывод о том, что полная погрешность прямого эксперимента удовлетворяет требованиям точности исследуемого измерительного средства – интеллектуального датчика влажности.

Выводы по шестой главе

1. Разработано математическое обеспечение режимов «Пуск» и «Процесс», лежащее в основе функционирования базы знаний ИИУС ТТА. 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.

2. Создано программное обеспечение ИИУС ТТА в основе, которого лежит объектно-ориентированный подход одним из его преимуществ является возможность разработать компоненты один раз и многократно их использовать, что позволяет оперативно осуществлять построение рабочих прототипов ИИУС различных ТТА на базе исследовательского прототипа.

3. Создана методика стыковки составляющих частей многозонныхных моделей основанная на комбинации принципа максимума с принципом динамического программирования.

4. Разработаны базы данных и знаний процессов «Пуск» и «Процесс» рабочего прототипа ИИУС СВЛ.

5. Созданы информационно-управляющая и информационно-измерительная подсистемы ИИУС СВЛ.

6. Построен на базе интегрированного графа интеллектуализации синтеза решения задач оптимального управления исследовательского прототипа ИИУС ТТА интегрированный граф ИИУС СВЛ.

7. Создана техническая реализация интеллектуального датчика влажности. Определены: максимальная систематическая погрешность интеллектуального датчика влажности, которая составляет ±10,8%, и полная погрешность прямого эксперимента ±6,8%.

7 ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В главе рассматриваются результаты применения ИИУС ТТА в производственных условиях на примерах реализации синтеза управляющих воздействий в режимах «Пуск» и «Процесс» ИИУС СВЛ и ИИУС ТОМ-1 в производственных условиях. Для чего разрабатываются аналитические модели процесса «Пуск» технологического оборудования вальцеленточной сушильной установки – СВЛ и установки отжига магнитопроводов – ТОМ-1 (в том числе модели переменной структуры), а также решаются задачи оптимального управления различными режимами этих объектов.

7.1 Примеры синтеза управляющих воздействий в режиме «Пуск» вальцеленточных сушильных установок

В режиме «Пуск» необходимо разогреть камеры СВЛ без загрузки пастообразного материала до их рабочей температуры. В соответствии с классификацией систем на МСФ задача управления относится к первому классу согласно [185]. Здесь в качестве объектов управления рассматриваются паровые калориферы камер. При управлении СВЛ решается задача ресурсосберегающего управления (2.8)–(2.10) для функционала вида (1.2). Для решения поставленной задачи определяется множество моделей (2.41) вида (2.42).

Определение видов моделей камер, числа зон и оценки параметров проводилось согласно методике (3.1)–(3.8). Для чего был поставлен эксперимент, в результате которого получены термограммы разогрева пятикамерной СВЛ (рис. 7.1). Экспериментальные данные приведены в табл. П Б.1. При решении задачи структурной идентификации (3.9)–(3.12) модели разогрева СВЛ получены наилучшие структуры моделей процесса динамики нагрева камер, с использованием

формул (3.14)–(3.28). В качестве основного критерия выбора наилучшей структуры использован минимум максимального значения абсолютной погрешности Δz модели (см. (3.13)). В таблице 7.1 отражены результаты структурной идентификации в виде многозонных моделей камер СВЛ.

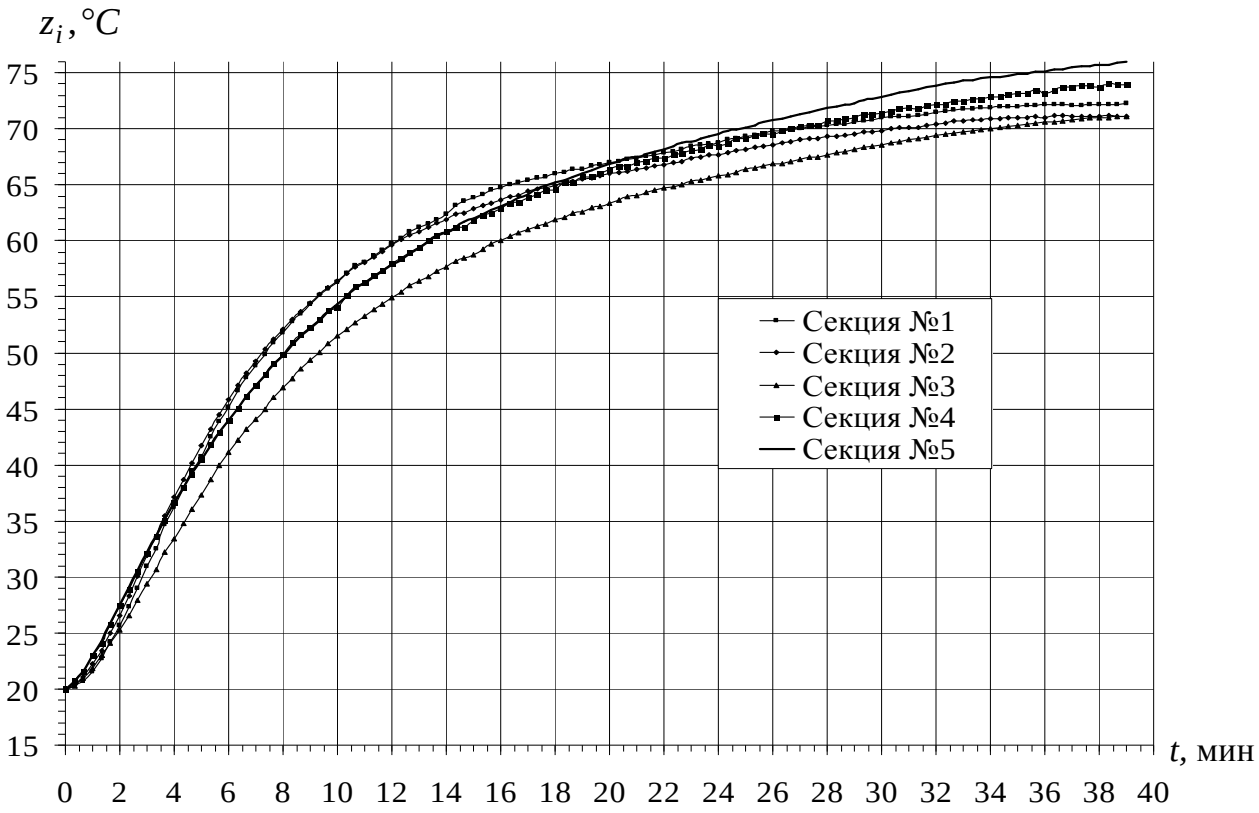


Рисунок 7.1. Термограммы нагрева камер СВЛ

Таблица 7.1 Структуры многозонных моделей динамики нагрева камер СВЛ

Номер камеры	Структура многозонной модели
1	ДА+ДА
2	РДИ+А+А
3	ДИ+А+А
4	ДА+ДА
5	ДА+РДИ

С использованием программного модуля «Идентификация модели объекта управления» экспертной системы «Энергосберегающее управление динамиче-

скими объектами» [268] проведены структурная и параметрическая идентификация моделей динамики нагрева и произведены оценка их погрешностей. Стыковка зон моделей проводилась согласно алгоритмам, описанных в разделах 3.3 и 5.1.

Калориферы, установленные в камерах СВЛ, отличаются своими техническими характеристиками и, следовательно, изменяются виды и параметры моделей динамики m_i для каждой камеры. Определяются оптимальная управляющая программа $u_i^*(\bullet) = \left(u_i^*(t), t \in [t_i^0, t_i^к]\right)$ и траектория изменения фазовых координат $z_i^*(\bullet) = (z_i^*(t), t \in [t_i^0, t_i^к] / u_i^*(t))$, соответствующие, каждой зоне.

Сформулированную выше (2.8)–(2.10) задачу управления процессом нагрева можно представить в виде отдельных задач для каждой камеры СВЛ [47, 46, 19]. Эти задачи управления принадлежат классу задач с закрепленными концами траектории изменения фазовых координат и ограничениями на управление, при этом минимизируется функционал расход топлива.

Приведем результаты функционирования ИИУС СВЛ при управлении пятикамерной СВЛ. Задача ресурсосберегающего управления может быть сформулирована следующим образом. Задано множество моделей

$$\mathcal{M} = \{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\},$$

где каждая модель имеет вид:

$$M_1: \begin{pmatrix} \dot{z}_{11}^1 \\ \dot{z}_{12}^1 \\ -- \\ \dot{z}_{11}^2 \\ \dot{z}_{12}^2 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0{,}1028 & -0{,}9747 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{11}^1(t) \\ z_{12}^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0{,}0875 \end{pmatrix} u_1^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0{,}2228 \end{pmatrix} l_1^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0{,}3464 \end{pmatrix} r_1^1(t),\ z_{11}^1 \in [20;59{,}7), \\ \text{----------} \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0{,}8615 & -0{,}1319 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{11}^2(t) \\ z_{12}^2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1{,}1032 \end{pmatrix} u_1^2(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0{,}7312 \end{pmatrix} l_1^2(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0{,}2746 \end{pmatrix} r_1^2(t),\ z_{11}^2 \in [59{,}7;71]. \end{cases}$$

$$M_2: \begin{pmatrix} \dot{z}_{21}^1 \\ \dot{z}_{22}^1 \\ -- \\ \dot{z}_{21}^2 \\ -- \\ \dot{z}_{21}^3 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0{,}1402 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{21}^1(t) \\ z_{22}^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0{,}788 \end{pmatrix} u_2^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0{,}1091 \end{pmatrix} l_2^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0{,}2439 \end{pmatrix} r_2^1(t),\ z_{21}^1 \in [20;37{,}1); \\ \text{----------} \\ -0{,}3203 z_{21}^2(t) + 0{,}088 u_2^2(t) - 0{,}0941 l_2^2(t) + 0{,}733 r_2^2(t),\ z_{21}^2 \in [37{,}1, 56{,}4); \\ \text{----------} \\ -0{,}1213 z_{21}^3(t) + 0{,}2365 u_2^3(t) - 0{,}102 l_2^3(t) + 0{,}328 r_2^3(t),\ z_{21}^3 \in [56{,}4, 69{,}8]. \end{cases}$$

$$M_3:\begin{pmatrix}\dot z^1_{31}\\ \dot z^1_{32}\\ --\\ \dot z^2_{31}\\ --\\ \dot z^3_{31}\end{pmatrix}=\begin{cases}\begin{pmatrix}0&1\\0&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}z^1_{31}(t)\\ z^1_{32}(t)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0\\0{,}1225\end{pmatrix}u^1_3(t)+\begin{pmatrix}0\\0{,}0519\end{pmatrix}l^1_3(t)+\begin{pmatrix}0\\0{,}0793\end{pmatrix}r^1_3(t),\ z^1_{31}\in[20;29{,}4);\\ ----------\\ -0{,}284z^2_{31}(t)+0{,}1608u^2_3(t)+0{,}5175l^2_3(t)+0{,}8112r^2_3(t),\ z^2_{31}\in[29{,}4;51{,}5);\\ ----------\\ -0{,}094z^3_{31}(t)+0{,}1801u^3_3(t)+0{,}1279l^3_3(t)+0{,}011r^3_3(t),\ z^3_{23}\in[51{,}5;71{,}1].\end{cases}$$

$$M_4:\begin{pmatrix}\dot z^1_{41}\\ \dot z^1_{42}\\ --\\ \dot z^2_{41}\\ \dot z^2_{42}\end{pmatrix}=\begin{cases}\begin{pmatrix}0&1\\-0{,}2253&-0{,}3757\end{pmatrix}\begin{pmatrix}z^1_{41}(t)\\ z^1_{42}(t)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0\\0{,}1772\end{pmatrix}u^1_4(t)+\begin{pmatrix}0\\0{,}1317\end{pmatrix}l^1_4(t)+\begin{pmatrix}0\\0{,}4508\end{pmatrix}r^1_4(t),\ z^1_{41}\in[20;58),\\ ----------\\ \begin{pmatrix}0&1\\-0{,}1492&-0{,}0941\end{pmatrix}\begin{pmatrix}z^2_{41}(t)\\ z^2_{42}(t)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0\\0{,}0516\end{pmatrix}u^2_4(t)+\begin{pmatrix}0\\-0{,}672\end{pmatrix}l^2_4(t)+\begin{pmatrix}0\\0{,}096\end{pmatrix}r^2_4(t),\ z^2_{41}\in[58{,}7;71{,}4].\end{cases}$$

$$M_5:\begin{pmatrix}\dot z^1_{51}\\ \dot z^1_{52}\\ --\\ \dot z^2_{51}\\ \dot z^2_{52}\end{pmatrix}=\begin{cases}\begin{pmatrix}0&1\\-0{,}1549&-0{,}4715\end{pmatrix}\begin{pmatrix}z^1_{51}(t)\\ z^1_{52}(t)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0\\0{,}1133\end{pmatrix}u^1_5(t)+\begin{pmatrix}0\\-1{,}1003\end{pmatrix}l^1_5(t)+\begin{pmatrix}0\\-0{,}0687\end{pmatrix}r^1_5(t),\ z^1_{51}\in[20;57{,}9),\\ ----------\\ \begin{pmatrix}0&1\\0&-0{,}8291\end{pmatrix}\begin{pmatrix}z^2_{51}(t)\\ z^2_{52}(t)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0\\0{,}2574\end{pmatrix}u^2_5(t)+\begin{pmatrix}0\\0{,}7862\end{pmatrix}l^2_5(t)+\begin{pmatrix}0\\-0{,}2604\end{pmatrix}r^2_5(t),\ z^2_{51}\in[57{,}9;72{,}9].\end{cases}$$

Состояния системы с учетом дестабилизирующих факторов по каналу измерения и ограничения на управления задаются следующими условиями:

$$y^j_i=z^j_{i1}(t)+v^j_i(t),\ i=\overline{1,5},\ j=\overline{1,3},$$

$$z^j_i(t_0)=(20;20;20;20;20)^{\mathrm T}\ \rightarrow\ z^j_i(t_{\kappa})=(71;69{,}8;71{,}1;71{,}4;72{,}9)^{\mathrm T},$$

$$\forall t\in[t_0,t_{\kappa}]:u^j_i(t)\in[0{,}100].$$

При этом минимизируется функционал расход топлива

$$J=\int_{t_0}^{t_{\kappa}}\left|u^j_i(t)\right|dt\rightarrow\min.$$

Графики управляющих воздействий рассчитанных согласно комбинированному алгоритму управления, рассмотренному в главе 5 приведены на рис.7.2. На рис. 7.3 изображены траектории изменения первой фазовой координаты при оптимальном и традиционном управлении. Термограммы разогрева всех камер пятикамерной сушильной установки при оптимальном управлении приведены в табл. П Б.2.

Для управления движением рабочих органов в СВЛ используются электроприводы, содержащие двигатели. В СВЛ присутствуют двигатели рецирку-

ляционных вентиляторов в каждой камере, двигатель общего вытяжного вентилятора, двигатели вальцов, пластинчатого и скребкового транспортеров.

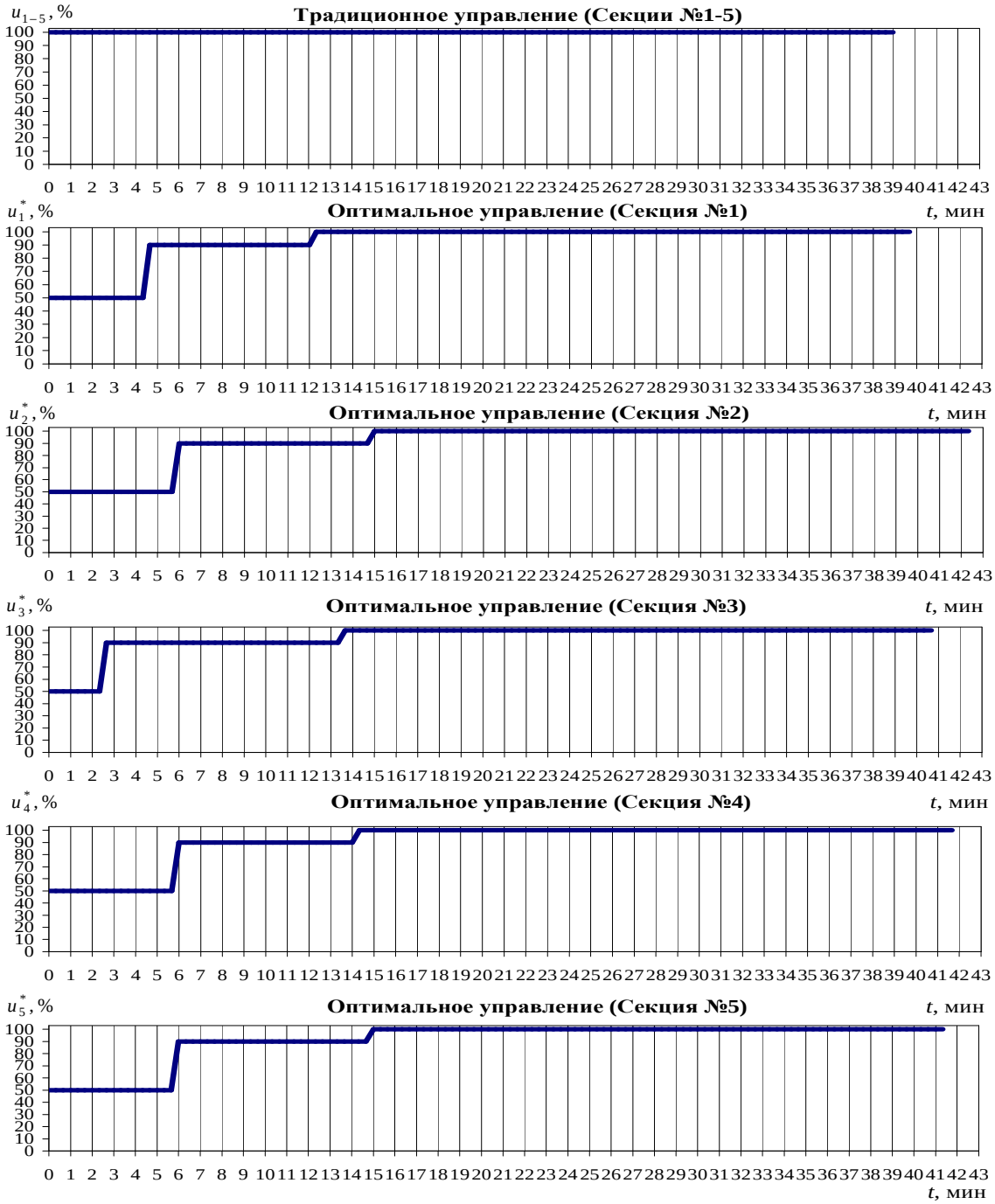


Рисунок 7.2. Графики управляющих воздействий для пятикамерной СВЛ

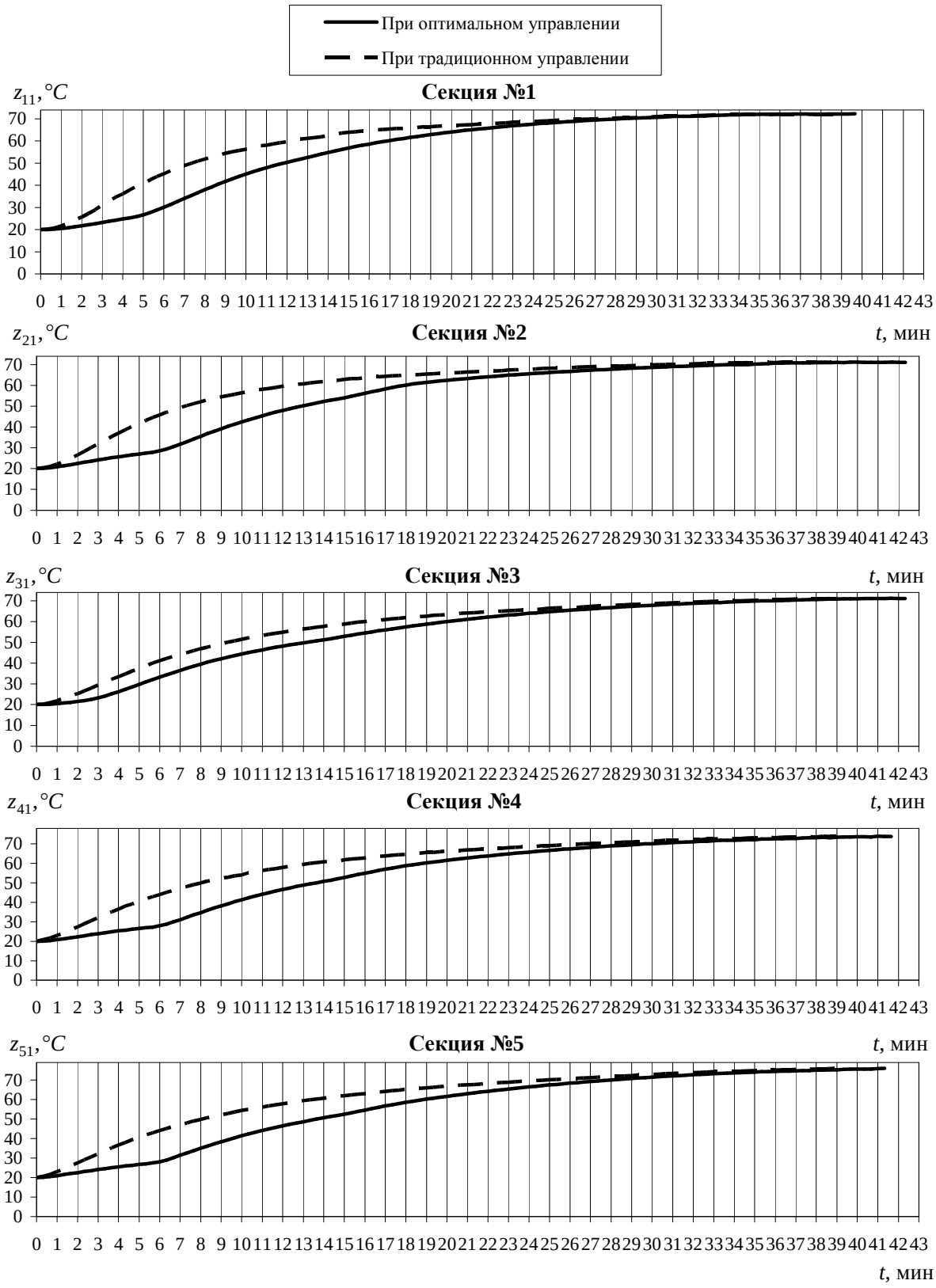


Рисунок 7.3. Графики траекторий изменения фазовых координат для пятикамерной СВЛ при оптимальном и традиционном управлении

Асинхронный трехфазный двигатель

В качестве объекта энергосберегающего управления рассмотрим двигатель асинхронный трехфазный с короткозамкнутым ротором, синхронная скорость вращения 3000 об/мин, число лопастей крыльчатки – 31, время выхода в статический режим 370 мс, интервал дискретизации 20 мс. Кривая разгона приведена на рис. 7.4.

При управлении двигателем решается задача энергосберегающего управления (2.8)–(2.10) для функционала вида (1.1). Согласно [237, 238, 250], в качестве модели можно использовать дифференциальные уравнения, соответствующие объекту первого порядка – апериодическое звено (3.15). Параметры модели определяются согласно методике (3.1)–(3.8) по формулам (3.22). Массив реквизитов ЗОУ имеет следующий вид:

$$R = (a = -0.0025,\ b = 0.033,\ u_0 = 0,\ u_в = 380,\ t_0 = 50,\ t_к = 400,\ z_0 = 0,\ z_k = 3000).$$

В результате решения задачи управления с использованием модуля <А, Э, Пр, О> [268] получена оптимальная программа управления, имеющая вид:

$$u_7^*(t) = \begin{cases} 115{,}176e^{-0{,}00209(t-t_0)} + u_0,\ t \in [t_0, 289{,}21) \\ u_в,\ t \in [289{,}21, t_k]. \end{cases},$$

Интерфейс используемого модуля представлен на рис. 7.5.

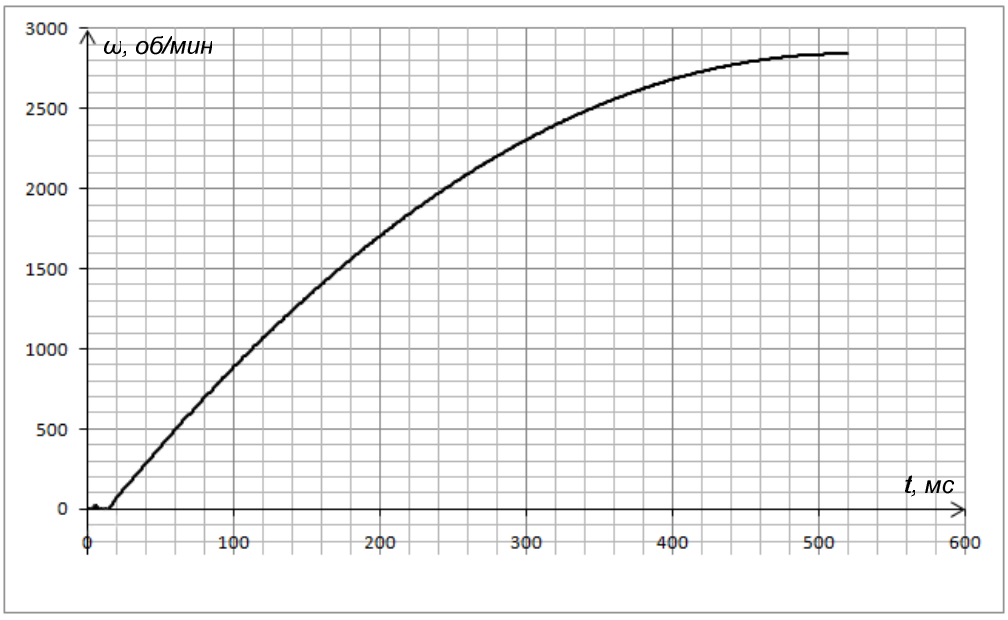


Рисунок 7.4. Кривая разгона двигателя

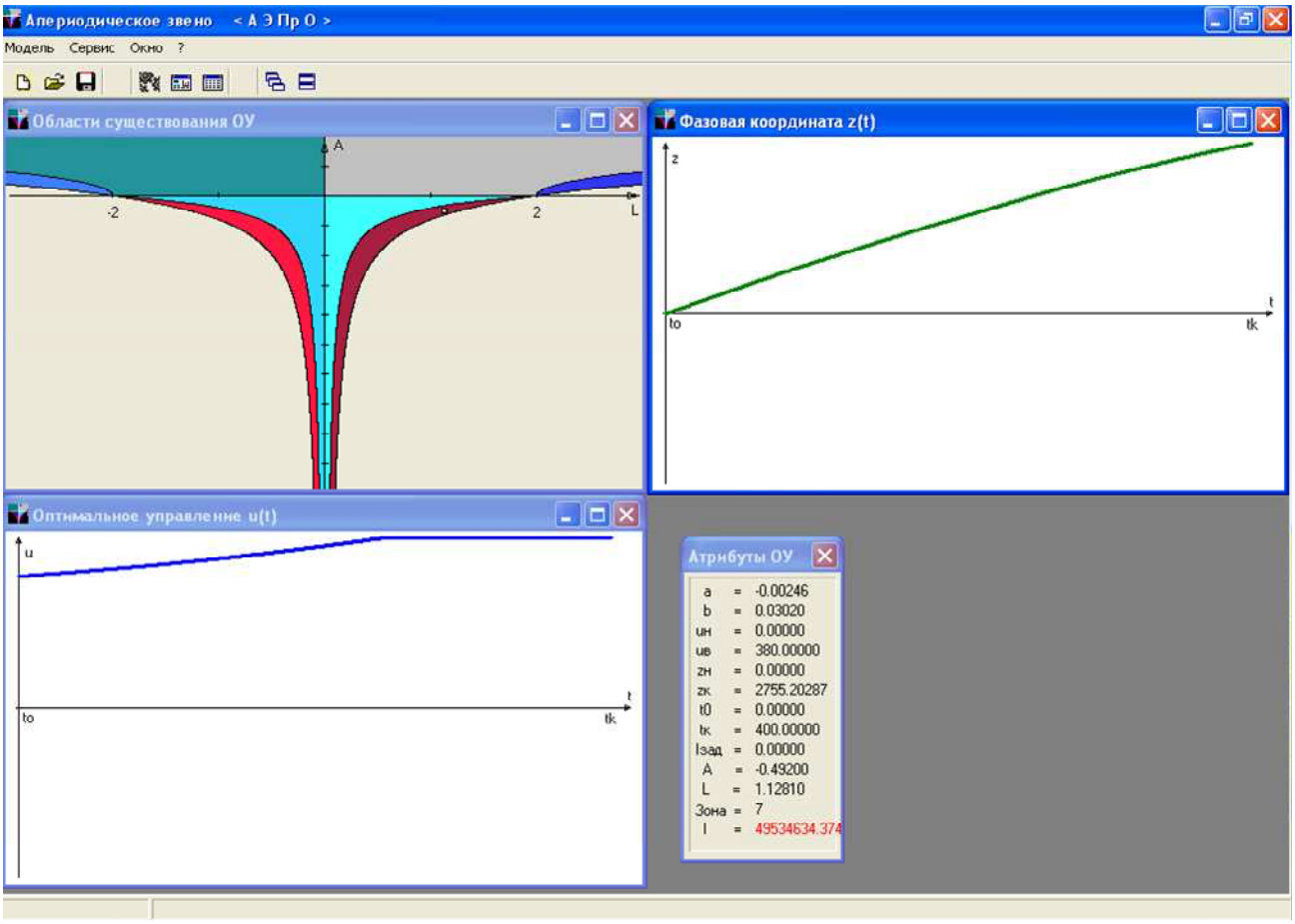


Рисунок 7.5. Графический интерфейс модуля анализа оптимального управления <А, Э, Пр, О>

Экономия энергии при данном управлении асинхронным двигателем составляет 13,93%.

Имеется внедрение интеллектуальной информационно-управляющей системы на ОАО «Пигмент» (г. Тамбов). Она применяется для управления режимами динамики процесса сушки красителей, которые входят в состав типографской краски. При этом в динамических режимах экономия энергоресурсов составила от 5 до 13,5%.

7.2 Примеры синтеза управляющих воздействий в режиме «Процесс» вальцеленточных сушильных установок

При управлении режимом «процесс» в СВЛ предлагается осуществлять мониторинг влажности пастообразного материала в камерах сушильной установки. Мониторинг проводится с использованием ИДВ в основе работы которого лежит оценка влажности материала по аналитической модели вида (3.53). Проведем оценку влажности материала для второй камеры пятисекционной вальцеленточной сушильной установки на примере выборки данных представленных в таблице 7.2. и на рис. 5.18. – кинетические кривые процесса сушки в вальцеленточной сушилке.

Таблица 7.2

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	Образцовая мера $\varphi_{n=2}$	Оценка влажности по модели $\varphi_{n=2}$
75	25	72	3.64	1	97.3	99.7	82.7	95	95	22.1	22.15259
72	22	69	3.71	1	92.5	100.3	83.6	100	95	22.2	22.16597
71	22	68	3.57	1	94.8	101.5	80.5	100	100	22.3	22.30241
74	25	72	3.64	1	90.8	96.7	81.8	95	95	23.2	23.24589
71	25	70	3.71	1	96.8	95.5	85	95	90	22.8	22.6828
77	23	68	3.46	1	95.2	101.5	84.2	95	95	22.7	22.88143
72	23	66	3.57	1	94.2	100.5	80.2	95	90	23.3	23.30486
76	24	74	3.61	1	94.7	97.5	81.6	100	95	23.1	23.04064
75	24	68	3.43	1	97.9	93.3	85.2	95	95	23	23.04651
73	23	68	3.61	1	95.5	93	82	100	90	24.2	24.2516

Для приведенных в таблице данных максимальная абсолютная погрешность оценки влажности по модели (3.53) не превышает 0.2, а относительная < 0,8%. Сходимость полученных значений позволяют сделать вывод, что применение модели дает достоверные результаты.

Управление процессом сушки в СВЛ с целью минимизации потерь качества и производительности предлагается осуществлять путем изменения скорости движения пластинчатого конвейера [209]. Рассмотрим пример нахождения скорости пластинчатого конвейера для пятикамерной СВЛ. Выберем скорость движения ленты равной $\tilde{u}_{\text{о}}^{\text{сл}}$ = 3,5 м/ч. При выбранной скорости влажность материала в контролируемой n-ой камере равна φ_n = 43% и лежит в нормированном диапазоне $G_{n=2}^{\text{уд}}$. Влажность материала в другой контролируемой $(n+1)$-ой камере равна φ_{n+1} = 23% и лежит в нормированном диапазоне $G_{n+1=3}^{\text{пл}}$. Применяя метод Демпстера-Шафера, находим меру доверия к достижению требуемого качества материала на выходе СВЛ, она равна 0,123. Нечеткий вывод сделаем по следующим продукционным правилам:

If Φ_n = ВД and Φ_{n+1} = НВД and $\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = M, then $U^{\text{сл}}$ = СПОН, (0,9)

If Φ_n = Д and Φ_{n+1} = НВД and $\text{M}_{\text{k}}^{\text{к}}$ = M, then $U^{\text{сл}}$ = СПОН, (0,1)

(см. рис. 7.6).

Оптимальное значение $(\Delta u_o^{сл})^*$, на которое следует уменьшить скорость движения пластинчатого конвейера, рассчитано по функционалу (5.32) и равно – 0,24. При этом, следовательно, увеличится время пребывания исследуемого материала в камерах СВЛ. В итоге значение скорости движения пластинчатого транспортера $\tilde{u}_{\text{о}}^{\text{сл}}$ должна быть равным 3,26 м/ч.

При следующей итерации в результате уменьшения скорости движения на предыдущем шаге, увеличилось время нахождения материала в камерах СВЛ, при этом его влажность изменилась и стала в обеих камерах принадлежать нормированным интервалам $G_{n=2}^{\text{х}}$ (значение $\varphi_{n=2}^{\text{к}}$=37%) и $G_{n+1=3}^{\text{х}}$ (значение $\varphi_{n+1=3}^{\text{к}}$=12%) (см. табл. 3.1). Для новых значений влажности материала в камерах СВЛ увеличилась мера доверия к достижению требуемого качества материала на выходе $m(\varphi_k^{\text{к}})$=0,942 (см. табл.3.3).

Далее вывод производится по следующему продукционному правилу

$$\text{If } \Phi_n = \text{Д} \text{ and } \Phi_{n+1} = \text{Д} \text{ and } \text{M}_{\text{k}}^{\text{к}} = \text{В}, \text{ then } U^{\text{сл}} = \text{О}$$

(см. рис. 7.7).

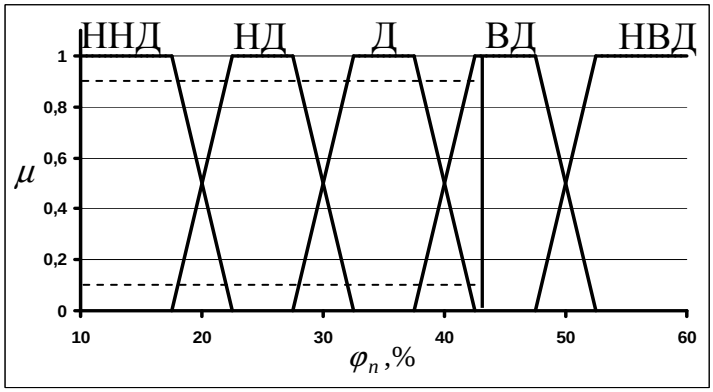
В этом случае скорость движения пластинчатого транспортера $\tilde{u}_{\text{о}}^{\text{сл}}$ остается неизменной и равной 3,26 м/ч. При этих синтезированных управляющих воздействиях без снижения производительности процесса качество материала на выходе СВЛ повысилось, что выражается в снижении его влажности $\varphi_{k=5}^{\text{к}}$ с 1,77% до 0,35%.

На рис. 7.8 и 7.9 приведены кинетические кривые изменения влажности материала с понижением и повышением скорости движения пластинчатого конвейера с использованием разработанной ИИУС СВЛ процессами сушки в многосекционных аппаратах соответственно.

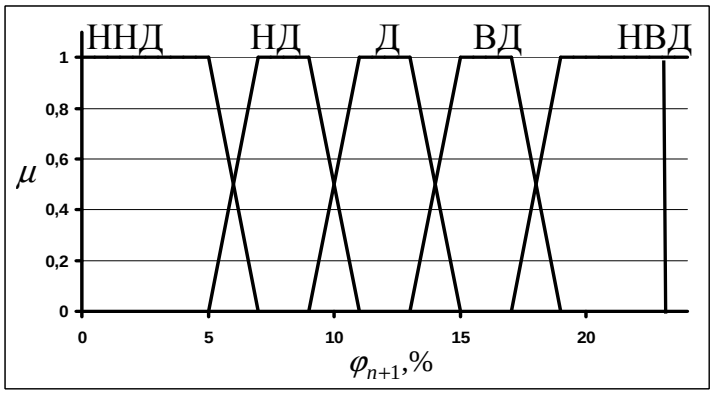
Результаты имитации работы ИИУС СВЛ см. рис. 7.10. Здесь отображены основные показатели процесса сушки: качество производимого материала и производительность процесса для двух вариантов сушки – без использования ИИУС СВЛ (а) и с использованием ИИУС СВЛ (б).

Применение ИИУС СВЛ приводит к повышению вероятности выхода качественной продукции до 0,98 и увеличению производительности процесса сушки на 5%.

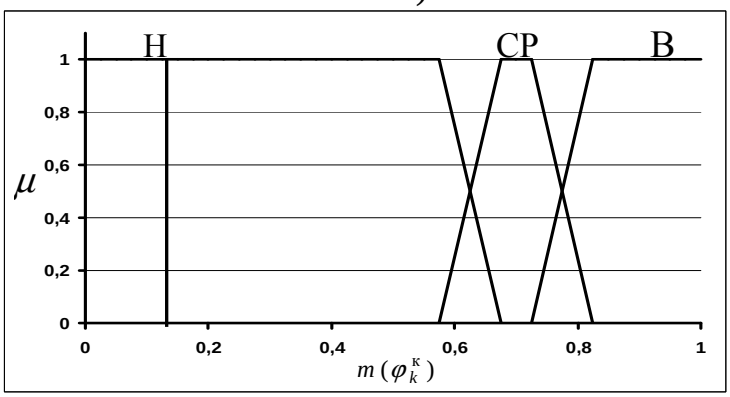
а)



б)



в)



г)

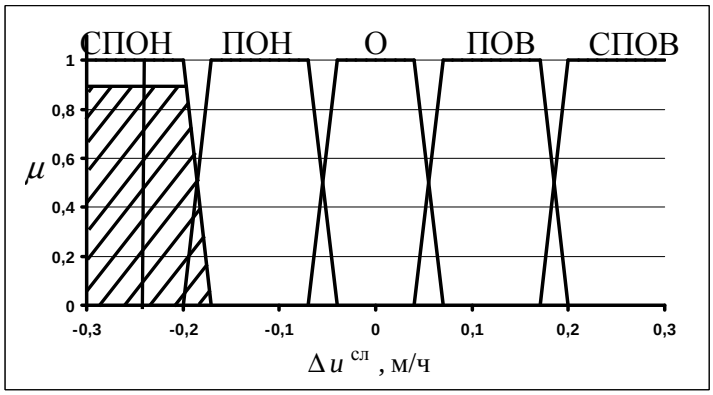
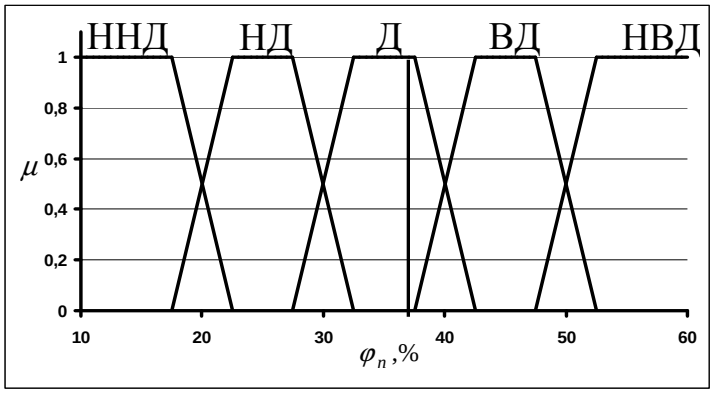
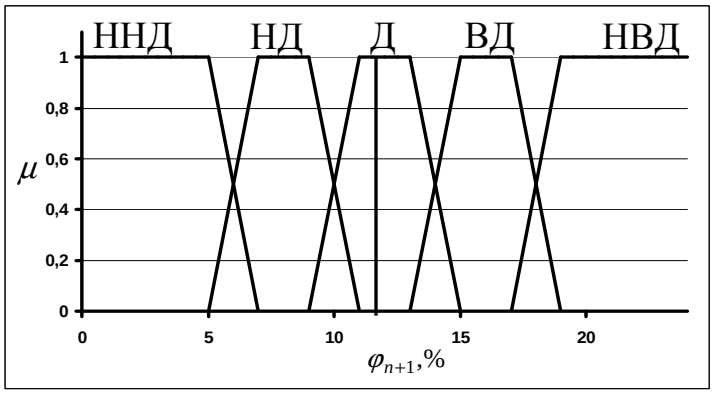


Рисунок 7.6. Значение выходной лингвистической переменной:
а) «влажность материала на выходе n-ой камеры»; б) «влажность материала на выходе ($n+1$)-ой камеры»; в) «мера доверия к достижению требуемой влажности материала на выходе сушилки»; г) «изменение скорости движения пластинчатого конвейера».

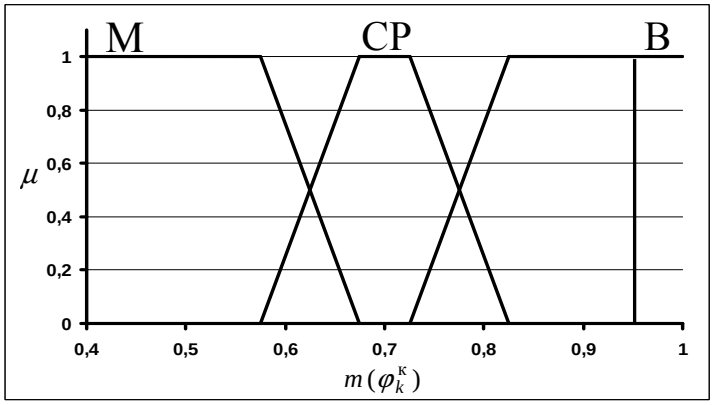
а)



б)



в)



г)

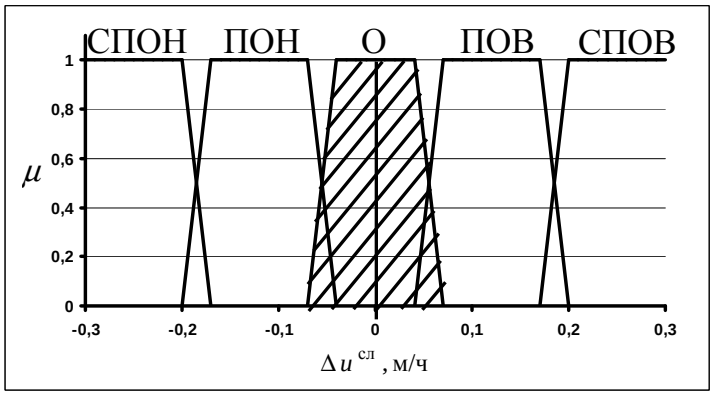


Рисунок 7.7. Значение выходной лингвистической переменной: а) «влажность материала на выходе n-ой камеры»; б) «влажность материала на выходе $(n+1)$-ой камеры»;в) «мера доверия к достижению требуемой влажности материала на выходе сушилки»;г) «изменение скорости движения пластинчатого конвейера»;

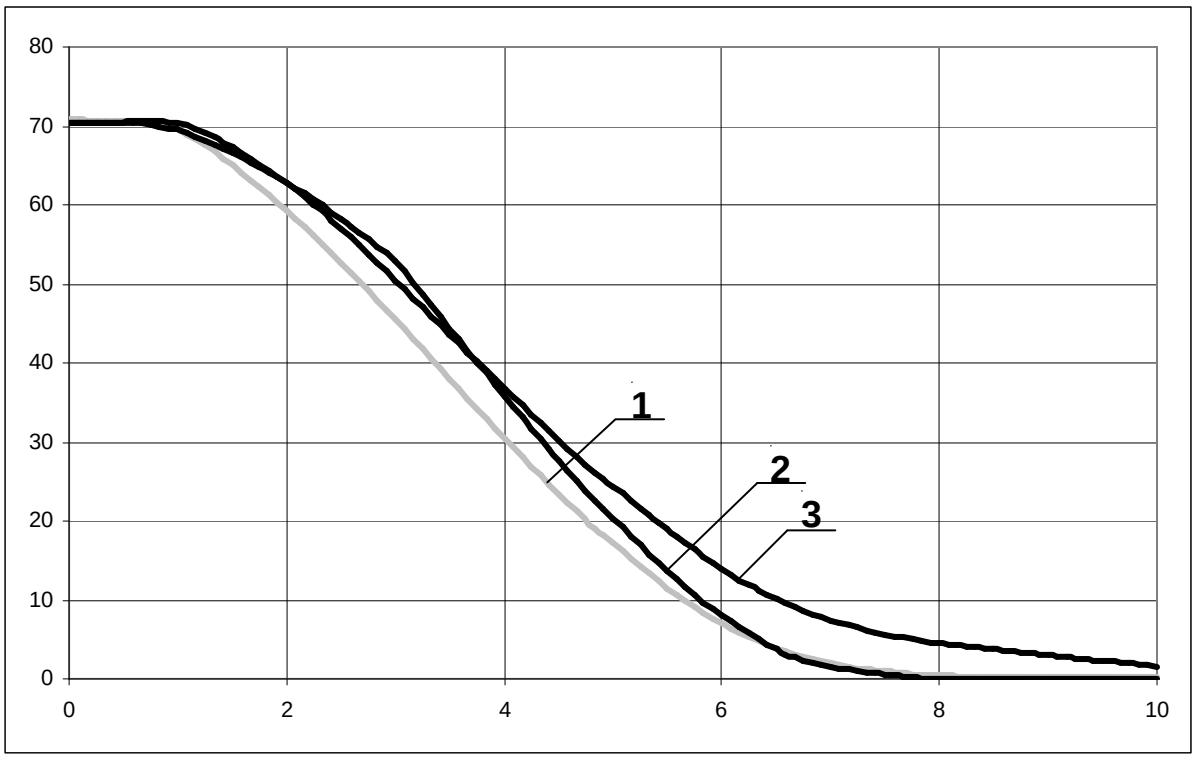


Рисунок 7.8. Управление сушкой с понижением скорости движения пластинчатого конвейера

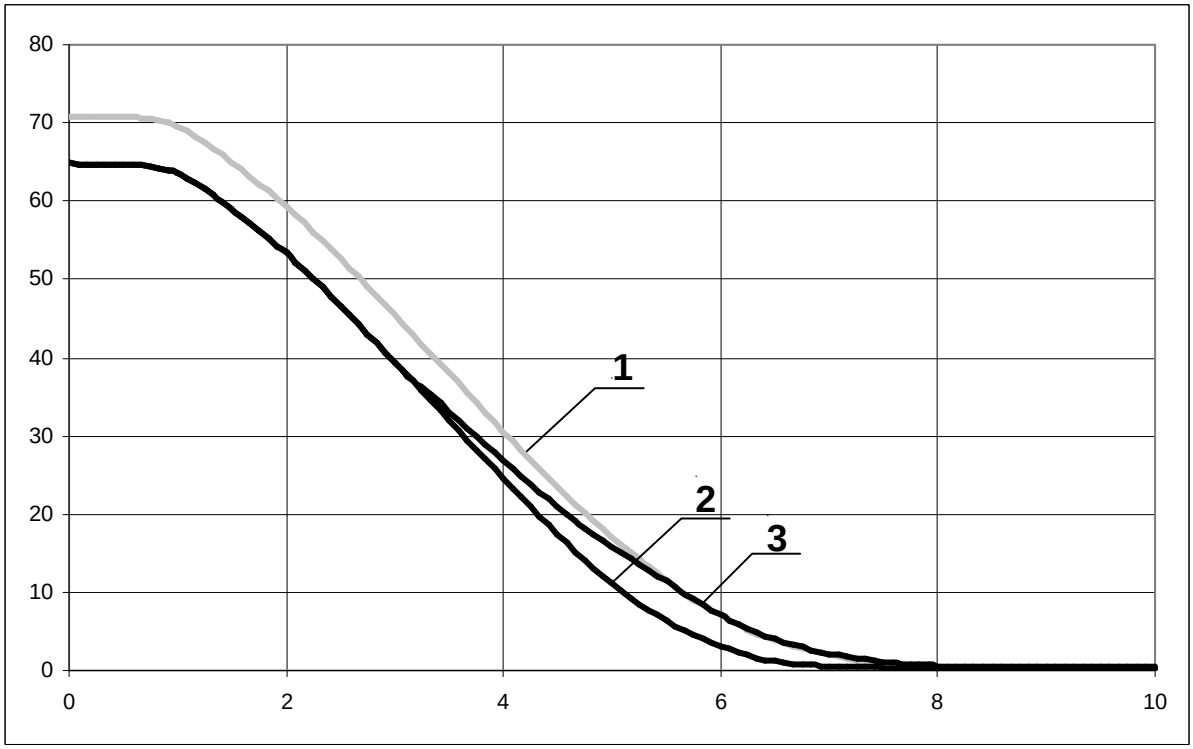
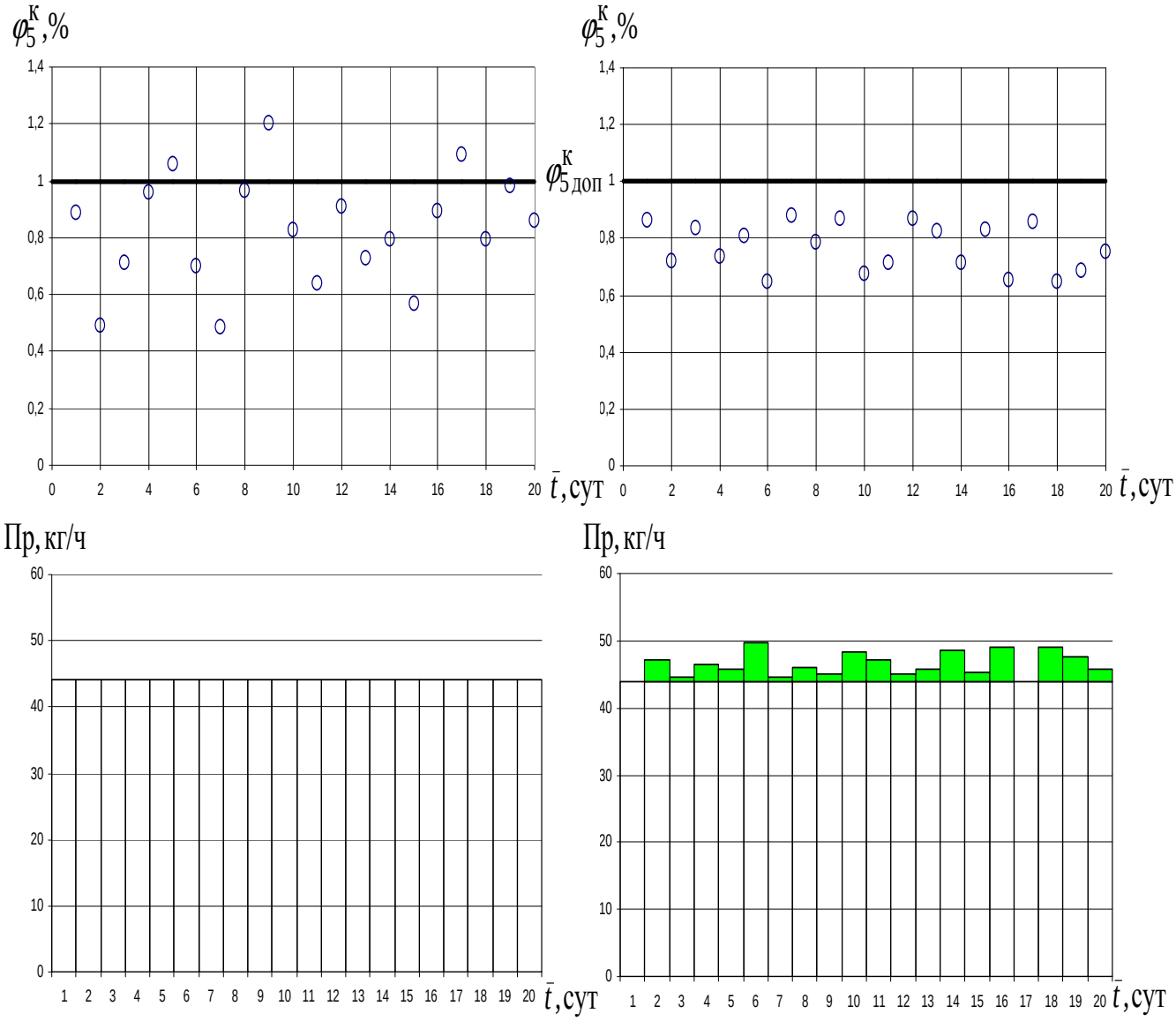


Рисунок 7.9. Управление сушкой с повышением скорости движения пластинчатого конвейера.

Здесь 1– идеальная кинетическая кривая, 2– кинетическая кривая с использованием алгоритма управления, 3 – кинетическая кривая без использования алгоритма управления.



а) б)

Рисунок 7.10. Основные показатели процесса сушки:

а) без использования ИИУС СВЛ; б) с использованием ИИУС СВЛ

7.3 Примеры синтеза энергосберегающего управления режимом «Пуск» установки отжига магнитопроводов (ТОМ-1)

В качестве объекта управления рассматривается технологическая установка термообработки магнитопроводов ТОМ-1. ТОМ-1 представляет собой проходную печь сопротивления. В печи (полное техническое описание установки приведено в приложении Д) обрабатываются заготовки магнитопроводов различных типоразмеров, представленные в табл. П Д.1. Для каждых типа и размера сердечника магнитопровода в печи установлен лоток, соответствующего размера, при этом (см. табл. П Д.1) изменяется показатели режима отжига: температура в печи, продолжительность цикла, давление.

При проектировании ИИУС ТОМ-1 было пройдено два этапа. На первом этапе использовался исследовательский прототип ИИУС ТТА. Проводились разработка математического аппарата и программного обеспечения ИИУС ТОМ-1 для решения задач управления нагревом по следующей методике:

– первичная обработка входной информации (термограммы нагрева), с применением алгоритмов сглаживания;

– идентификация объекта на множестве состояний функционирования;

– оценка параметров моделей нагрева;

– проверка адекватности моделей нагрева;

– выбор стратегии работы управляющего устройства на множестве состояний функционирования;

– исследование влияния ДФ и параметров объектов на затраты энергии при эксплуатации.

– получение программ и синтезирующих функций оптимального управления нагревом;

– отработка полученных программ с использованием имитеционных моделей объектов;

– коррекция параметров модели;

– расчет ступенчатого квазиоптимального управления нагревом (в случае необходимости);

– разработка алгоритмов работы устройств, минимизирующих затраты энергии, при программной и позиционной стратегиях;

– создание интегрированного графа «технологии интеллектуализации синтеза управляющих воздействий» ТОМ-1 и наполнение баз данных и знаний;

– выбор технического обеспечения ИИУС ТОМ-1;

– построение архитектуры ИИУС ТОМ-1;

– создание программного обеспечения для микропроцессорных управляющих устройств.

На первом этапе объект управления заменяется его аналитической моделью, представляющей его на множестве состояний функционирования. При рассмотрении задачи управления на МСФ можно выделить два основных случая: разогрев остывшей печи и ее догрев, к последнему случаю относятся и смены температурных режимов. Этим двум случаям соответствуют два семейства моделей M_1 (для разогрева) и M_2 (для догрева), каждое из которых содержит различные дифференциальные уравнения [278, 49].

Математически задачу оптимального управления можно записать в следующем виде. Нелинейный объект, описываемый множеством моделей,

$$M = \{M_1, M_2\},$$

представляющих обыкновенные дифференциальными уравнения вида

$$M_j : \dot{z} = F(z,u,t), F = \{f_1, f_2, ..., f_m\}, j = 1,2,$$

необходимо перевести из начального состояния z_0 в конечное z_k, т. е.

$$z(t = t_0) = z_0 \rightarrow z(t = t_k) = z_k,$$

при ограничениях на управление

$$\forall t \in [t_0, t_k]: \quad u(t) \in [u_0, u_1], \quad \int_{t_0}^{t_k} u^2(t)dt \le \bar{I}_p.$$

и минимуме функционала

$$I = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t)dt \to \min_u .$$

Задача энергосберегающего управления процессами нагрева ТОМ-1 предполагает определение «рабочей» модели из семейства M_1 или M_2, а затем решение задачи управления. Требуется найти:

рабочую модель объекта, удовлетворяющую требованиям точности,

$$\dot{z} = F_j(z,u,t), F_j \subset F ,$$

оптимальную управляющую программу

$$u^*(\bullet) = (u^*(t), t \in [t_0, t_k]), \qquad (7.1)$$

оптимальную траекторию изменения вектора фазовых координат при этой программе

$$z^*(\bullet) = (z(t), t \in [t_0, t_k] / F_w, u^*(t)),$$

и оценить значение минимизируемого функционала [49].

Здесь z – фазовая координата для инерционного объекта первого порядка и вектор $z=(z_1,z_2)^T$ фазовых координат для объектов второго порядка; z_0 – начальное значение, z_k – конечное значение вектора z; начало и конец временного интервала управления обозначены через t_0,t_k; u – управляющее воздействие, u_0, u_1 –нижнее и верхнее значения интервала управления; I – минимизируемый функционал; I_p – допустимое значение функционала.

Решение данной задачи производится на основе предварительного исследования возможных синтезирующих функций и построения областей их существования, т. е. полного анализа управляющих воздействий на множестве состояний функционирования МСФ.

На втором этапе при построении рабочего прототипа ИИУС ТОМ-1 управление производится непосредственно объектом, в частности, установкой отжига сердечников ТОМ-1.

Динамика разогрева печи рассматривается на МСФ (данные нагрева приведены в табл. П Д.2), для чего используются два семейства моделей M_1 и M_2. Применительно к исследуемому объекту задачи управления могут принадлежать

к первому или к третьему классу (см. гл.1). Одностадийные модели семейства M_2, используется при полностью разогретой печи для смены температуры отжига, например от 790 ^{0}C для Шл 25х32 до 920 ^{0}C для Шл 32х40. Здесь при описании процесса нагрева используется апериодическое звено. Такая задача управления решается с использованием четверки <А Э Пр 0>.

Динамика процесса разогрева полностью остывшей печи описывается семейством M_1 – многостадийных моделей.

Введение МСФ при оптимальном управлении производится с целью более полного рассмотрения задач анализа и синтеза, управляющих воздействий с учетом возможных изменений условий работы системы в процессе реальной эксплуатации. Множество состояний функционирования системы вводится на основе состояний ее частей.

Выделим отдельные части системы управления, независимо друг от друга меняющие свои состояния функционирования. Такими частями являются собственно технологическая установка, напряжение в сети, характеристики отжигаемых магнитопроводов, температура окружающей среды.

Обозначим множества состояний частей вида H_1 для печи; H_2 – загрузки, H_3 – напряжения питания сети, H_4 – температуры окружающей среды.

Множество H_1 с учетом особенностей физических процессов теплообмена при разогреве печи содержит три элемента, соответствующие трем участкам термограммы (см. рис. 7.11).

Первому участку (состояние $h_{1,1}$) соответствует следующий интервал температуры $z_{h_{1,1}} \in [10,355]$. На нем происходит разогрев самих ТЭНов, при этом коэффициент теплоотдачи α зависит, прежде всего, от его конвективной составляющей $\alpha_к$, и практически не зависит лучистой составляющей $\alpha_л$, значение которой мало. Модель объекта записывается в виде дифференциального уравнения второго порядка.

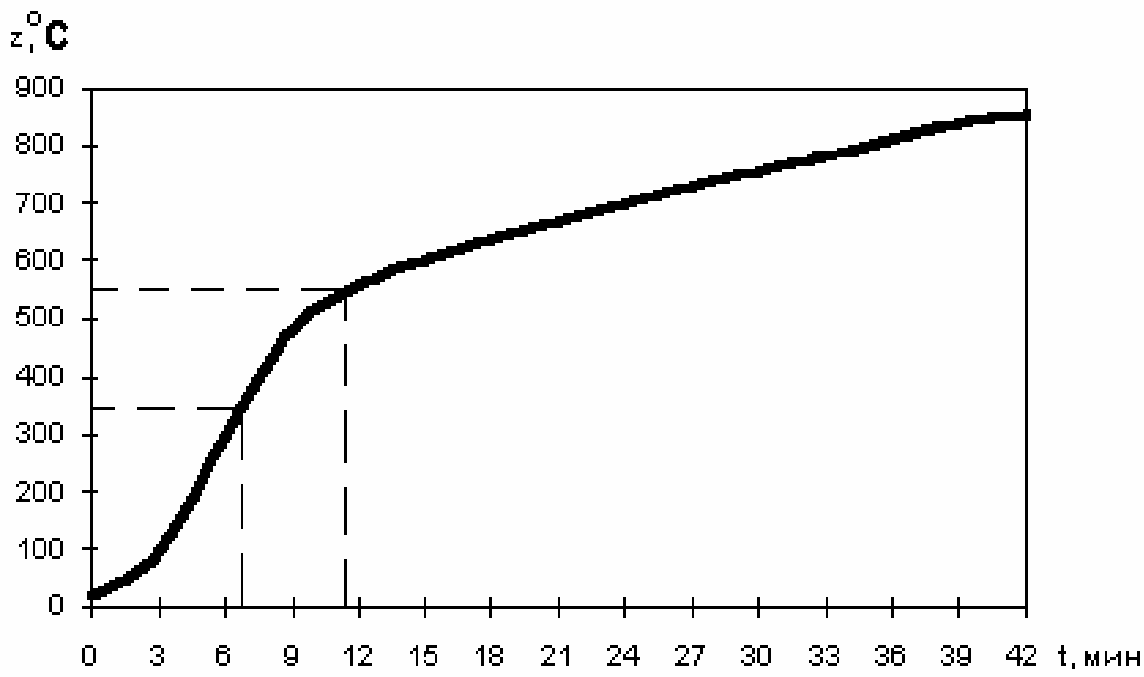


Рисунок 7.11. Термограмма нагрева ТОМ-1.

На втором участке (состояние $h_{1,2}$) $z_{h_{1,2}} \in [355,550]$ коэффициент теплоотдачи α зависит, прежде всего, от лучистой составляющей $\alpha_{л}$, которая соизмерима с конвективной составляющей или даже превосходит ее.

На третьем участке (состояние $h_{1,3}$) $z_{h_{1,3}} \in [550;850]$ за счет нагревания внешних стенок печи и ее кожуха происходят существенные потери в окружающую среду. Имеем следующие показатели потерь: при 550^0С внутри печи температура на ее кожухе 29^0С; при 655^0С внутри – температура кожуха 35^0С; при 740^0С внутри – температура кожуха 42 ^{0}С; при 850 ^{0}С внутри – температура кожуха 55^0С.

Таким образом,

$$H_1 = \{h_{1,1}, h_{1,2}, h_{1,3}\}.$$

Так как в печи обрабатываются 16 различных типоразмеров магнитопроводов (см. табл. П Д.1), то $H_2 = \{h_{2,1}, h_{2,2}, ..., h_{2,15}\}$.

Напряжение питания сети может колебаться в значительных пределах (до 60 В). На основе статистических данных можно выделить три основные состояния $w_{3,1}$=320 В, $w_{3,2}$=350 В и $w_{3,3}$=380 В, т.е. $W_3 = \{w_{3,1}, w_{3,2}, w_{3,3}\}$.

Температура окружающей среды зависит от сезона, и в среднем летом она равна 20^0С, осенью и весной 15^0С, а зимой 12^0С, тогда $H_4 = \{h_{4,1}, h_{4,2}, h_{4,3}\}$.

Состояние функционирования системы h задается четырьмя компонентами: $h_v = (h_{1i}, h_{2j}, h_{3k}, h_{4l})$. Полагаем, что состояние h изменилось, если меняется значение одной из компонент. Тогда множество H состояний функционирования системы является декартовым произведением четырех подмножеств H_i:

$$H = H_1 \times H_2 \times H_3 \times H_4 .$$

Учитывая состав множеств H_i, i=1,2,3,4 общее число состояний функционирования системы оптимального управления составляет несколько сотен (≈400).

Проведя анализ МСФ, выявлены наиболее вероятные подмножества $H_в$ и критические подмножества $H_{кр}$ состояния функционирования.

В качестве критических состояний $H_{кр}$, выделены те состояния, в которых ИИУС ТОМ-1 может приносить убытки. Например, низкое напряжение питания и низкая температура в цехе. С учетом подмножеств $H_в$ и $H_{кр}$ определено подмножество рабочих состояний функционирования $H_{раб} = H_в \times H_{кр}$.

На основании проведенного анализа выделено подмножества рабочих состояний $H'_{раб}$ и $H''_{раб}$. Первое подмножество состояний функционирования имеет место при разогреве холодной печи до рабочих температур. Оно включает три состояния:

$$H'_{раб} = \{ h_1 = (H_{1,1}; H_{2,0}; H_{3,2}; H_{4,2}),\quad h_2 = (H_{1,2}; H_{2,0}; H_{3,2}; H_{4,2}),$$
$$h_3 = (H_{1,3}; H_{2,0}; H_{3,2}; H_{4,2}) \}.$$

В каждом из этих состояний используется своя модель динамики процесса нагрева. Общая модель на множестве $H'_{раб}$ записывается следующим образом

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ --- \\ \dot{z} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & a_{h_1} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b_{h_1} \end{pmatrix} u(t), z \in [18;355); \\ ---------- \\ a_{h_2} z(t) + b_{h_2} u(t), z \in [355;550); \\ a_{h_3} z(t) + b_{h_3} u(t), z \in [550;850]. \end{cases} \qquad (7.2)$$

Данная модель относится к моделям 3-го класса. Здесь состояние h_1 описывает двойной интегратор с погрешностью $\Delta_{h_1} = 2\ ^0C$, а состояния h_2 и h_3-апериодические звенья с различными параметрами a и b и массивами реквизитов максимальные погрешности которых $\Delta_{h_2} = 1{,}3\ ^0C$ и $\Delta_{h_3} = 0{,}8\ ^0C$ соответственно.

Оптимальное управление ищется в виде программы (7.1). Расчет оптимальной программы связан с определением видов функций и расчетом параметров функции управления для каждой стадии модели отдельно и решением задачи их временной стыковки.

Задача временной стыковки заключается в определении оптимального значения времен t_i^* переключения программ. Для их расчета используется модернизированный метод динамического программирования [160,119]. От обычного метода он отличается тем, что на каждом шаге находится оптимальное управление с использованием метода синтезирующих переменных. Кроме того, для момента времени t_1 осуществляется стыковка скорости изменения температуры в конце первой и начале второй зон.

Массив реквизитов для задачи управления, которая решается с использованием модели (7.2) может быть представлен тремя составляющими

	a_i	b_i	$u_н$	$u_в$	t_0	$t_к$	z_0	$z_к$
$R_1(h_1)$=	1,	0.045,	0,	350,	0,	7,	18,	355);
$R_2(h_2)$=	-0.1306,	0.2692,	0,	350,	7,	11,	355,	550);
$R_3(h_3)$=	-0.014,	0.0556,	0,	350,	11,	42,	550,	850).

В результате решения получена оптимальная программа управления (приложение Д табл. П Д.3), имеющая вид:

$$\tilde{u}^{*}(\bullet)=\begin{cases}\tilde{u}_1^{*}(t)=122{,}04-7{,}96\,t, & t\in[0;13{,}1),\\ \tilde{u}_2^{*}(t)=\begin{cases}175+150{,}2e^{0.1306\,(t-13{,}1)}, & t\in[13{,}1;14{,}3),\\ 350, & t\in[14{,}3;19),\end{cases}\\ \tilde{u}_3^{*}(t)=\begin{cases}175+139{,}6e^{0{,}014\,(t-19)}, & t\in[19;35{,}1),\\ 350, & t\in[35{,}1;52];\end{cases}\end{cases}$$

здесь функция $\tilde{u}_1^{*}(t)$ принадлежит области первого вида задачи двойного интегратора, а $\tilde{u}_2^{*}(t)$ и $\tilde{u}_3^{*}(t)$ - области k_7, представленной на рис. 4.1. Полученная программа снижает энергозатраты на 13% по сравнению с традиционным нагревом при u=const, значения u^{*} и z^{*} приведены на рис. 7.12.

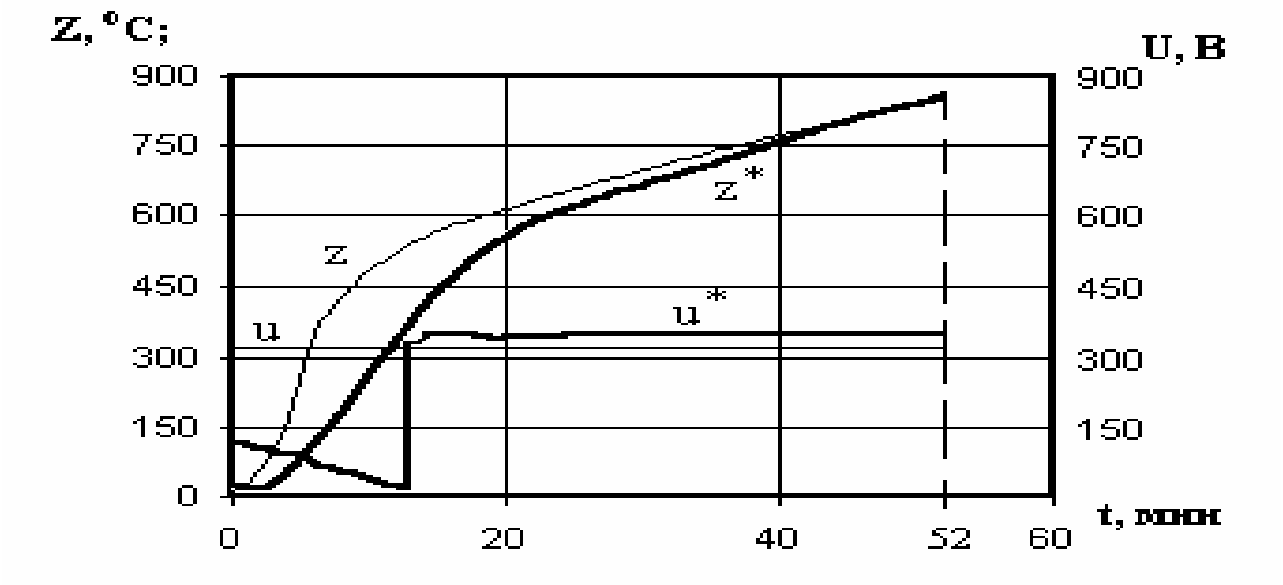


Рисунок 7.12. Температурные зависимости и управляющие воздействия процессами нагрева в технологической установке ТОМ-1 при оптимальном и традиционном управлениях

Подмножество $H''_{раб}$ включает четыре состояния в этом случае решаемая задача управления относится к 1-му классу задач на МСФ. Модели принадлежат семейству M_2. Здесь решается задача (4.4) и происходит изменение $z_к$, принимающее значение 600÷950 ^{0}C, при этом изменяются параметры модели a и b и временной интервал. Анализируя табл. П Д.1, проведена группировка

состояний h_1 для магнитопроводов типов 1-8, h_2 для 9-12, h_3 для 13 и 14, а h_4 -15. Массивы реквизитов имеют вид:

	a	b	u_0	$u_к$	t_0	$t_к$	z_0	$z_к$
$R_1(h_1)$={	-0.104,	0.2672,	0,	350,	0,	5,	785,	823};
$R_2(h_2)$={	-0.1039,	0.2677,	0,	350,	0,	8,	785,	850};
$R_3(h_3)$={	-0.0127,	0.1244,	0,	320,	0,	20,	600,	920};
$R_4(h_4)$={	-0.041,	0,1258,	0,	360,	0,	30,	785,	950 }.

Тогда множество $H''_{раб}$ включает четыре состояния функционирования $H''_{раб}=\{h_1,h_2,h_3,h_4\}$, где $h_1=(H_{1,3};H_{2,1};H_{3,2};H_{4,1})$, $h_2=(H_{1,3};H_{2,2};H_{3,2};H_{4,3})$, $h_3=(w_{1,3};w_{2,3};w_{3,2};w_{4,2})$, $h_4=(H_{1,3};H_{2,4};H_{3,2};H_{4,3})$. Для этих состояний функционирования рассчитаны оптимальные программы:

$$u_7^*(t/h_1)=\begin{cases}175+136{,}44e^{-0{,}104(t-t_0)}, & t\in[0;2{,}39),\\ 350, & t\in[2{,}39;5];\end{cases}$$

$$u_7^*(t/h_2)=\begin{cases}175+158{,}86e^{-0{,}1039(t-t_0)}, & t\in[0;0{,}93),\\ 350, & t\in[0{,}93;8];\end{cases}$$

$$u_3^*(t/h_3)=175+27{,}87e^{-0.0127(t-t_0)}, t\in[0;20];$$

$$u_7^*(t/h_4)=\begin{cases}175+91{,}97e^{-0{,}041(t-t_0)}, & t\in[0;15{,}4),\\ 350, & t\in[15{,}4;30].\end{cases}$$

Приведенные здесь программы позволяют снизить энергозатраты на 5-15%.

В результате проведенных исследований было сделано описание объекта на МСФ, для каждого состояния функционирования получена модель и синтезирована программа энергосберегающего оптимального управления.

В промышленных электропечах сопротивления часто используются нагреватели из карбида кремния. Они могут обеспечивать работу электропечей до 1350-1400 ^{o}C.

Большие поперечные сечения типов нагревателей обусловлены значительным удельным сопротивлением карбида кремния (800-1500 Ом•мм^2/м в диапазоне температур на поверхности нагревателя 100-1450 ^{o}C), а также недостаточной прочностью в нагретом состоянии.

Электрическое сопротивление нагревателей с повышением температуры до 900-950^{o}C уменьшается, затем возрастает.

Важнейшим эксплуатационным свойством нагревателей из карбида кремния является постепенное повышение их электрического сопротивления при работе. Это свойство называется старением нагревателей. Исследования [179] показали, что увеличение сопротивления нагревателей зависит от изменения фазового состава материала нагревателей в процессе их эксплуатации. Окисление карбида кремния при рабочих температурах приводит к образованию кремнезема, повышающего сопротивление нагревателей. Если карбид кремния длительно находится при высоких температурах и периодически охлаждается, кремнезем претерпевает полиморфные превращения. Испытаниями установлено наличие в его составе кристобалита, количество которого пропорционально времени эксплуатации нагревателей. Особенно опасно превращение α-кристобалита в β-кристобалит, происходящее весьма интенсивно в интервале150-270^{o}C и сопровождающееся изменением объема материала. Вследствие этих причин отечественным нагревателям присуще ступенчатое увеличение электрического сопротивления при нагреве.

Скорость старения зависит от величины удельной поверхностной мощности, рабочей температуры, атмосферы, режима работы электропечи, вида регулирования, схемы соединения, а также от качества изготовления нагревателей.

Старение нагревателей, работающих при постоянном напряжении приводит к постепенному понижению мощности, а следовательно, и температуры в элекропечи. Поэтому для поддержания постоянного значения мощности при повышении электрического сопротивления нагревателя необходимо соответствующее повышение напряжения. Для периодического (или

постоянного в период работы нагревателя) повышения напряжения используют тиристорные регуляторы напряжения.

Применение созданной ИИУС ТОМ-1 наряду с экономичным использованием энергии позволяет продлить срок службы нагревателей. Целью моделирования также являлось исследование влияния параметров модели объекта на результат решения задачи управления при программной стратегии управления (постановка задачи приведена в разделе 2.5). Здесь значения параметров a_i, b_i получены при помощи генератора случайных чисел. Статистические характеристики параметров модели для каждой зоны приведены в таблице 7.3. Для каждого параметра бралась выборка по 50 опытам.

Таблица 7.3. Статистические характеристики параметров модели

	b_1 (зона один)*	a_2 (зона два)	b_2 (зона два)	a_3 (зона три)	b_3 (зона три)
Математическое Ожидание	0,045	-0,1306	0,2692	-0,014	0,0556
Среднеквадратическое отклонение	0,00225	-0,00653	0,01346	-0,0007	0,00278
Минимальное Значение	0,038198	-0,145759	0,239809	-0,015739	0,048367
Максимальное Значение	0,050117	-0,117732	0,301176	-0,01266	0,060974
Размах вариации	0,011919	0,028027	0,061367	0,003079	0,012607

*Для первой зоны варьирование параметра a_1 не проводилось.

Для каждого значения параметра проводилась проверка существования решения задачи управления при помощи метода синтезирующих переменных по следующему алгоритму:

1. Рассчитывались значения синтезирующих переменных L_i, A_i $(i=\overline{1,3})$ для всех возможных значений параметров модели по следующим формулам:

– зона один

$$L_1 = \frac{\left(z_{2k}^l - z_{20}^l\right) - 0{,}5b_1\left(u_{high} + u_{low}\right)\left(t_1 - t_0\right)}{0{,}25b_1\left(u_{high} - u_{low}\right)\left(t_1 - t_0\right)},$$

$$A_1 = \frac{8\left(z_{10}^l - z_{1k}^l\right)}{b_1\left(u_{high} - u_{low}\right)\left(t_1 - t_0\right)^2} + \frac{8z_{1k}^l}{b_1\left(u_{high} - u_{low}\right)\left(t_1 - t_0\right)} - 2\left(u_{high} + u_{low}\right);$$

– зона два

$$L_2 = 4\frac{z_k^l - z_0^l\, e^{a_2(t_2 - t_1)}}{b_2\left(u_{high} - u_{low}\right)\left(t_2 - t_1\right)} - 2\frac{\left(u_{high} + u_{low}\right)\left(e^{a_2(t_2 - t_1)} - 1\right)}{a_2\left(\left(u_{high} - u_{low}\right)\left(t_2 - t_1\right)\right)}, \quad A_2 = \frac{a_2\left(t_2 - t_1\right)}{2};$$

– зона три

$$L_3 = 4\frac{z_k^l - z_0^l\, e^{a_3(t_3 - t_2)}}{b_3\left(u_{high} - u_{low}\right)\left(t_3 - t_2\right)} - 2\frac{\left(u_{high} + u_{low}\right)\left(e^{a_3(t_3 - t_2)} - 1\right)}{a_3\left(\left(u_{high} - u_{low}\right)\left(t_3 - t_2\right)\right)}, \quad A_3 = \frac{a_3\left(t_3 - t_2\right)}{2}.$$

2. На области существования решения задачи управления отмечались точки, координатами которых являются значения синтезирующих переменных.

3. Если точка попадает внутрь области, то решение задачи управления существует, а если находится за границами – решение не существует.

На рисунке 7.13 показана область существования решения задачи управления для первой зоны (двойной интегратор). Координатами точек, показанных на рисунке 7.13, служат значения синтезирующих переменных для всех значений параметра модели b_1. Линии внутри области являются границами плоскостей φ_j, при помощи которых определяют виды функций управления, т.е. если точки находятся внутри нескольких плоскостей, то для управления необходимо применять различные функции управления – u_{φ_j}.

Как видно из рисунка 7.13 при изменении параметра модели b_1 меняется только вид функции управления, а решение задачи управления существует для всех значений параметра, а следовательно применение робастного управления в данной зоне не требуется.

Рассмотрим области существования решения для второй и третьей зон (рисунок 7.14, 7.15). Видно, что помимо изменения вида функции управления в

некоторых случаях решение задачи управления не существует, а значит необходимо использовать робастное управление.

Для обеспечения робастности СЭУ необходимо для всех возможных значений параметров модели объекта гарантировать существование решения задачи управления и определить виды функций управления.

Рассмотрим более детально ту часть области существования решения задачи управления, в которую попадают значения синтезирующих переменных для зоны один (рисунок 7.16).

Для зоны один возможные виды функций управления имеют вид: [49]

$$u_{\varphi_1}(t) = \begin{cases} u_{low}, t \in [t_0, t_{p_1}); \\ d_0 + d_1 t, t \in [t_{p_1}, t_{p_2}); \\ u_{high}, t \in [t_{p_2}, t_1]. \end{cases} \quad (7.3)$$

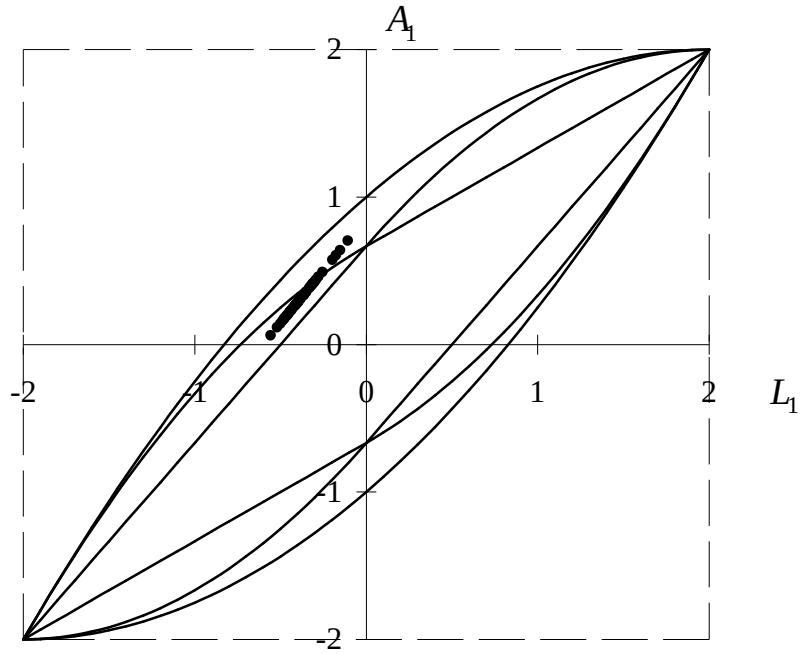


Рисунок 7.13. Область существования решения ЗОУ для зоны один

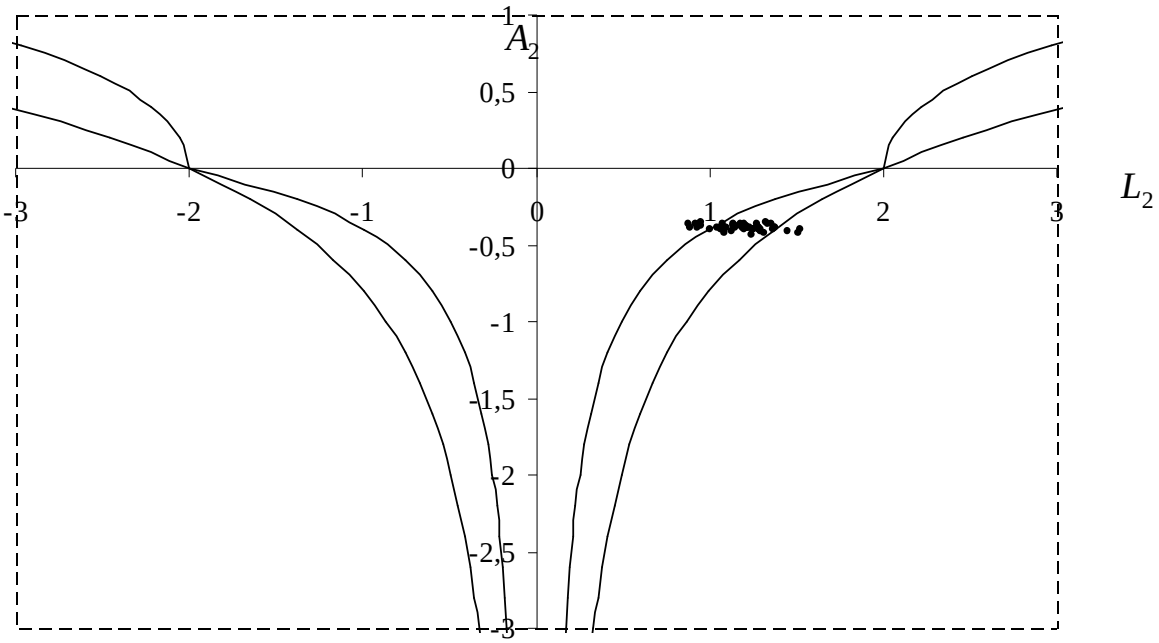


Рисунок 7.14. Область существования решения задачи управления для зоны два

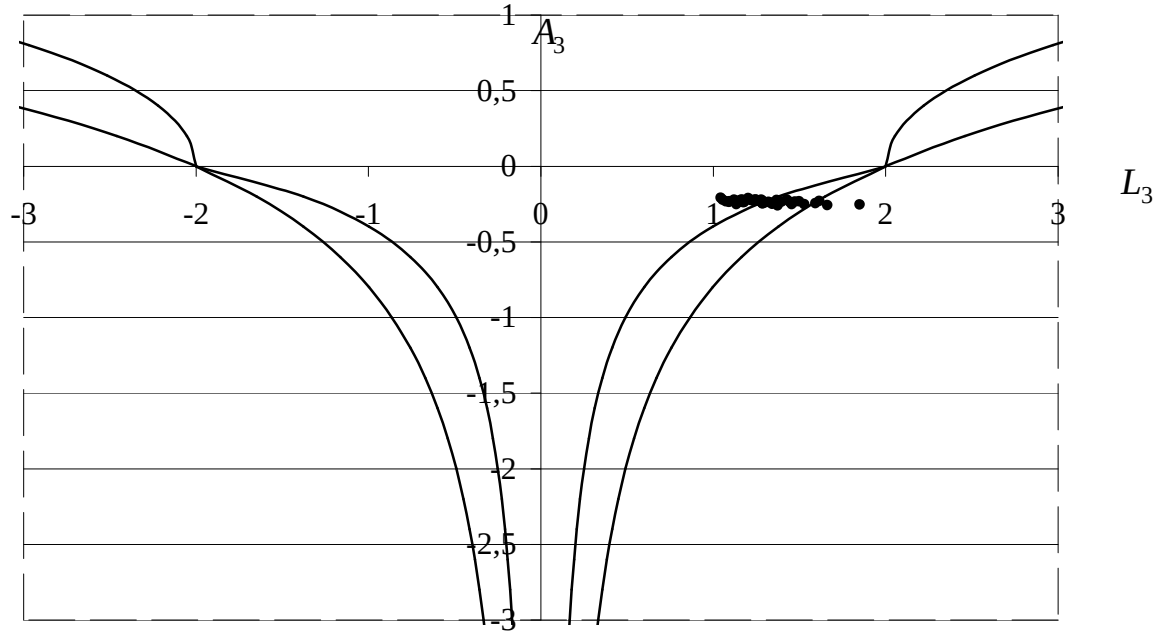


Рисунок 7.15. Область существования решения задачи управления для зоны три

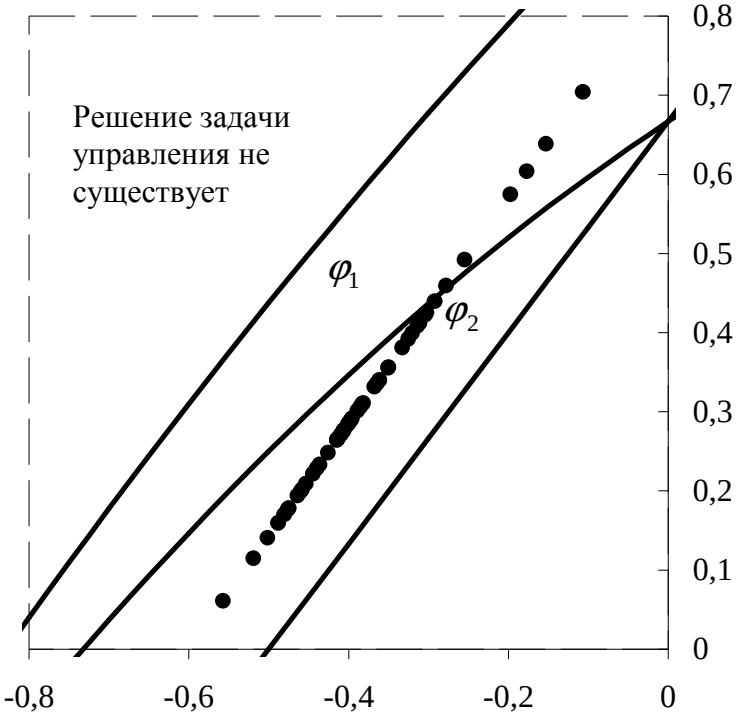
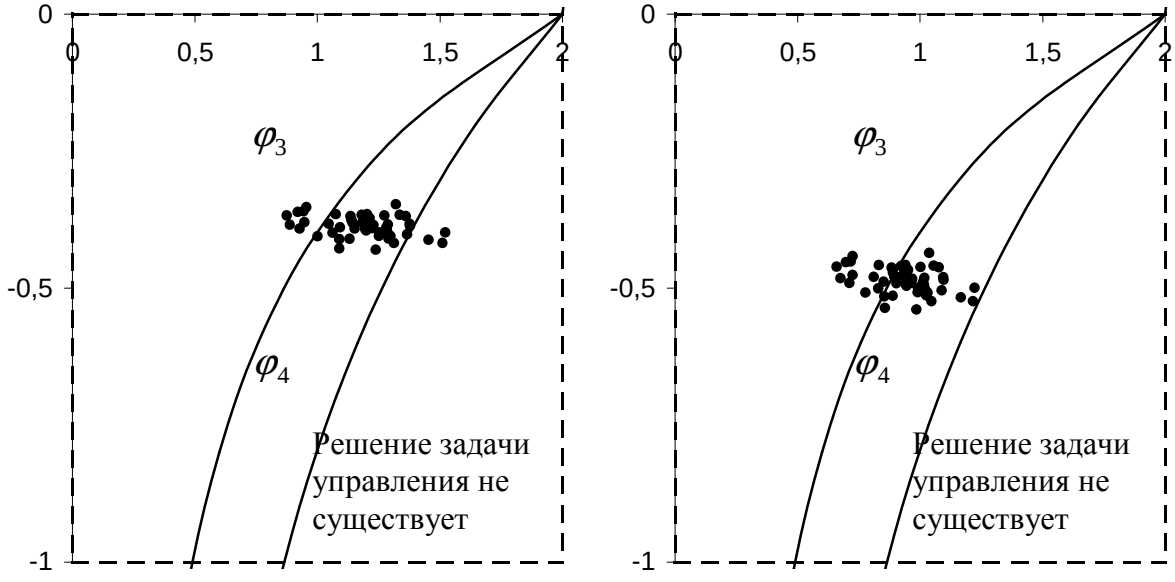


Рисунок 7.16. Часть области существования решения задачи управления для зоны один

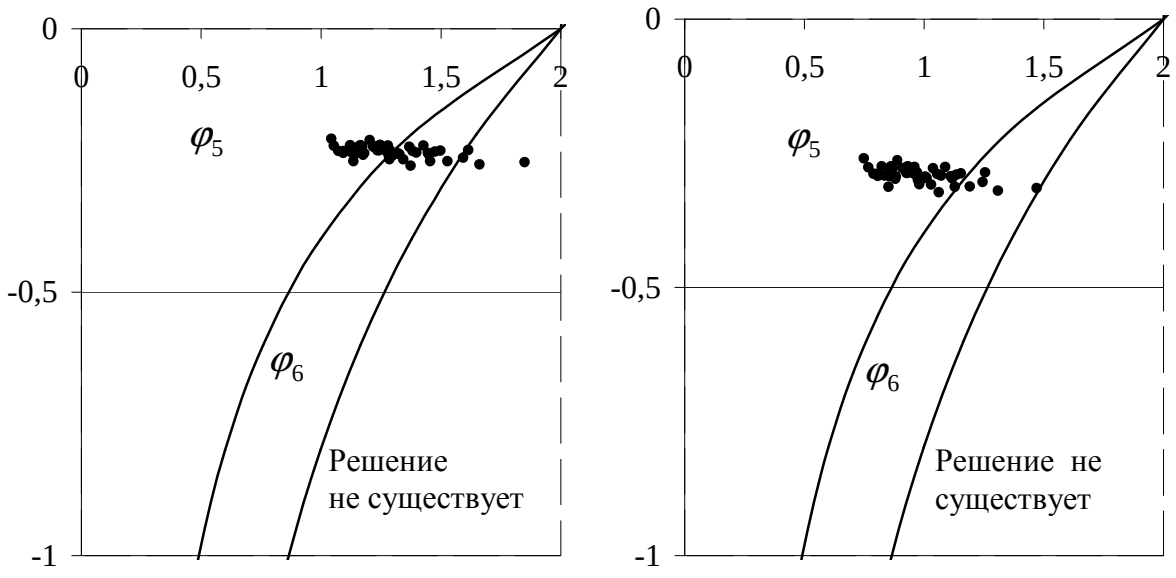


а) б)

Рисунок 7.18. Часть области существования решения задачи управления для второй зоны

а) при использовании энергосберегающего управления,

б) при использовании робастного управления.



а) б)

Рисунок 7.19. Часть области существования решения задачи управления для второй зоны

а) при использовании энергосберегающего управления,

б) при использовании робастного управления.

$$u_{\varphi_2}(t) = \begin{cases} u_{low}, t \in [t_0, t_{p_3}); \\ d_0 + d_2 t, t \in [t_{p_3}, t_1). \end{cases} \quad (7.4)$$

Здесь d_0, d_1, d_2 – параметры функций управления, t_{p_1}, t_{p_2}, t_{p_3} – время переключения.

Для реализации робастного управления в зонах два и три экспериментальным путем было подобрано время $t_2^r = 1{,}3$, $t_3^r = 8$. На рисунках 7.18а, 7.19а представлены области существования решения задачи управления с использованием энергосберегающего управления, а на рис. 7.16, б с использованием робастного управления.

Как видно из рисунков 7.17, 7.18 при использовании робастного управления решение задачи управления существует для всех возможных значений синтезирующих переменных, а следовательно для всех параметров модели.

Виды функций управления для второй зоны:

$$u_{\varphi_3}(t) = u_0 + d_3 e^{-a_2(t-t_1)}, t \in [t_1, t_2]; \quad (7.5)$$

$$u_{\varphi_4}(t) = \begin{cases} d_4 e^{-a_2(t-t_1)} + u_0, t \in [t_1, t_{p_4}); \\ u_{high}, t \in [t_{p_4}, t_2]. \end{cases} \quad (7.6)$$

Виды функций управления для третьей зоны:

$$u_{\varphi_5}(t) = u_0 + d_5 e^{-a_3(t-t_2)}, t \in [t_2, t_k]; \quad (7.7)$$

$$u_{\varphi_6}(t) = \begin{cases} d_6 e^{-a_3(t-t_2)} + u_0, t \in [t_2, t_{p_5}); \\ u_{high}, t \in [t_{p_5}, t_k]. \end{cases} \quad (7.8)$$

В формулах (7.5)-(7.8) u_0, d_3, d_4, d_5, d_6 – параметры функции управления, t_{p_4}, t_{p_5} – время переключения.

Таким образом, можно сделать следующие выводы: большое влияние на достижение конечной цели управления оказывает изменение параметров модели объекта вследствие воздействия возмущений; расширение границ временного интервала позволяет получить решение задачи управления при зашумленных значениях параметров модели объекта и обеспечить робастность ИИУС ТТА.

Выводы по седьмой главе

1. Получены аналитические модели в режиме «Пуск» технологического оборудования вальцеленточной сушильной установки – СВЛ, а также синтезированы управляющие воздействия, минимизирующие энерго- и ресурсопотребление на 5-10%.

2. Приведено решение задач синтеза управляющих воздействий в режиме «Процесс» в вальцеленточной сушильной установки с применением метода изменения скорости пластинчатого конвейера, синтезированы управляющие воздействия позволяющие увеличить вероятность выхода качественной продукции до 0,98 и повысить производительность на 5%.

3. Получены аналитические модели динамики переменной структуры для разогрева и догрева в режиме «Пуск» технологической установки отжига магнитопроводов – ТОМ с абсолютной погрешностью не превышающей 2^0 С. Решены задачи оптимального управления и синтезированы управляющие воздействия. Приведенные программы управления позволяют снизить энерго-затраты на 5-15%. Применение созданной ИИУС ТОМ-1 наряду с экономичным использованием энергии позволяет продлить срок службы карбид - кремниевых нагревателей, т.к. программы оптимального управления энергосберегающего оптимального управления дают возможность плавно повышать напряжение питания.

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 алгоритмизация 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 перемещения 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 дестабилизирующих 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 построении 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 построении 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 УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Аббревиатуры:

А – апериодическое звено;

АКОР – аналитическое конструирование оптимальных регуляторов;

БД – база данных;

БЗ – баз знаний;

В – высокая;

ВД – выше допустимой;

Д – допустимая;

ДА – двойное апериодическое звено;

ДИ – двойной интегратор;

ДУ – дифференциальные уравнения

ЗОУ – задача оптимального управления;

ИДВ – интеллектуальный датчик влажности;

ИИПС – информационно-измерительная подсистема;

ИИС – информационно-измерительная система;

ИИУС – интеллектуальная информационно-управляющая система;

ИС – информационная система;

ИУПС – информационно-управляющая подсистема;

ИУС – информационно-управляющая система;

МАОУ – модуль анализа оптимального управления;

МВ – модуль машины вывода;

МД – модуль определения мер доверия;

МИИ – модуль интеллектуального интерфейса;

МИМ – модуль имитационного моделирования;

МИММ – модуль идентификации математических моделей;

МИС – модуль идентификации стратегии;

МИСФ – модуль идентификации состояния функционирования;

МНЛВ – модуль нечеткого логического вывода;

МОД – модуль опроса датчиков;

МРИП – модуль реализации измерительных процедур;

МСВ – модуль супервизора;

МСОУ – модуль синтеза оптимального управления;

МСП – метод синтезирующих переменных;

МСФ – множество состояний функционирования;

МЦУ – модуль целей управления;

Н – низкая;

НВД – намного выше допустимой;

НД – ниже допустимой;

НЛ – нечеткая логика;

ННД – намного ниже допустимой;

ОУ – оптимальное управление;

ПА – процедурно-аналитические

ПМП – принцип максимума Понтрягина;

СР – средняя;

СВЛ – сушилка вальцеленточная;

ТИ – тройной интегратор;

ТОМ – термо отжиг магнитопроводов;

ТТА – тепло-технологические аппараты;

Условные обозначения:

$A_{i\mu}^{\text{У}}$, $A_{i\mu}^{\text{И}}$ – i-ый алгоритм соответствующей подсистем;

$K_{\text{о}}$. – класс ситуаций, характеризующийся тем, что значения влажности материала в контролируемых камерах принадлежат допустимому диапазону;

$K_{\text{Пр}}$ – класс ситуаций, характеризующийся тем, что значения влажности материала в контролируемых камерах ниже допустимых, или намного ниже допустимых. В этом случае можно повысить производительность процесса без ухудшения

качества выпускаемого материала;

$K_{\text{п}}$ – класс ситуаций, характеризующийся тем, что значения влажности материала в n-ой камере выходят за допустимые пределы, а в (n+1)-ой камере – принадлежат допустимому диапазону;

$K_{\text{п+1}}$ – класс ситуаций, характеризующийся тем, что значения влажности материала в n-ой камере принадлежат допустимому диапазону, а в (n+1)-ой камере – выходят за допустимые пределы;

$K_{\text{п,п+1}}$ – класс ситуаций, характеризующийся тем, что значения влажности материала в обоих контролируемых камерах выходят за допустимые пределы;

$M_{\text{ИУПС}}$ – модели информационно-управляющей и информационно-

$M_{\text{ИИПС}}$ измерительной подсистем;

$M_{\eta}^{\text{О}}$ – морфологическая модель объекта;

$IE_{ji}^{\text{У}}, IE_{ji}^{\text{И}}$ – j-ый информационный элемент i-го алгоритма подсистемы;

h – состояние функционирования;

$u(t)$ – управляющее воздействие;

$\vec{u}$ – вектор управляющих воздействий;

t_0 – начало временного интервала управления;

$t_{\text{к}}$ – конец временного интервала управления;

z^0 – начальное значение вектора z;

$z^{\text{к}}$ –конечное значение вектора z;

$u_{\text{н}}$ – нижняя граница управления;

$u_{\text{в}}$ – верхняя границы управления;

$I_{\text{э доп}}$ – допустимый лимит использования электроэнергии;

$I_{\text{т доп}}$ – запас топлива;

w – шум «цветной»;

w_1 –составляющая шума (коррелированная);

w_2 – составляющая шума (некоррелированная);

$\mathbf{A,B,C}$ – матрицы параметров модели объекта;

$M_{\text{ИИ}}$ – информационная модель интеллектуального интерфейса;

$\mathcal{DS}$ – множество сценариев диалогов;

$\mathcal{Pol}$ – множеством пользователей системы;

$\mathcal{P}_0$ – множество программного обеспечения;

$\mathcal{IS}$ – множество технических средств;

$S(\gamma)$ – критерий приведенных затрат;

$S^{\text{фпм}}$ – стоимость разработки функциональных программных модулей;

$S^{\text{со}}$ – системной отладки;

$S^{\text{БД}}$ – создания баз данных;

$S^{\text{БЗ}}$ – создания баз знаний;

$S^{\mathcal{DS}}$ – разработки сценариев диалога;

$S^{\mathcal{IS}}$ – технических средств системы;

$S^{\mathcal{P}_0}$ – программного обеспечения;

$S^{\text{Э}}$ – приведенная стоимость эксплуатации ИИУС ТТА.

$x^{У}_{i,\mu}$, $x^{\text{И}}_{i,\mu}$ – массивы принадлежности i-го алгоритма μ-му модулю соответствующих подсистем;

$y^{У}_{j,i}$, $y^{\text{И}}_{j,i}$ – массивы принадлежности j-го информационного элемента i-му алгоритму соответствующих подсистем;

$z^{\text{У}}_{\mu,\text{j}}$ $z^{\text{У}}_{\mu,\text{j}}$ – массивы взаимосвязи модулей с информационными элементами;

V – суммарный объем памяти;

$N^{\text{У}}_{\mu}$, $N^{\text{И}}_{\mu}$ – максимально допустимое количество алгоритмов в модулях; $D^{\text{У}}, D^{\text{И}}$

$q_{\text{ts}}^{\text{У}}, q_{\text{ts}}^{\text{И}}$ – суммарные критерии подбора технических средств,

S_{ts}^{TC}, P_{ts}^{TC} – стоимость и критерий пригодности использования ts-го технического средства;

S_{AP} – корректируемая стратегия управления или стратегия с применением нечеткой логики (Кр);

$S_{\text{пр}}$ – программная стратегия управления (Пр);

$S_{\text{пз}}$ – позиционная стратегия управления (Пз);

$H_i^{\text{мд}}$ – множество внутренних факторов, связанных с изменением вида и параметров моделей динамики;

$H^{\text{кф}}$ – множество факторов, косвенно влияющие на управляющие воздействия;

$H^{\text{ос}}$ – множество факторов изменения окружающей среды (температура, влажность, давление и т.д.);

$H_i^{\text{дф}}$ – множество дестабилизирующих факторов в каналах управления и измерения;

$\mathcal{H}^{\text{р}}$ – множество состояний работоспособности;

$\mathcal{H}_{\text{В}}$ – подмножество наиболее вероятных состояний (состояния с нормальной работоспособностью элементов);

$\mathcal{H}_{\text{К}}$ – подмножество наиболее критических состояний (состояния с отказами технических средств);

$\mathcal{M}_h$ – множество математических моделей ИИУС ТТА;

$E_{\text{доп}}$ – допустимая величина ошибки,

q – функция ошибки, обычно квадратичная;

$\mathcal{E}$ – функционал ошибки $E(t)$;

M_S – подмножество базовых моделей;

$\mathcal{SM}$ – множество альтернативных структур модели;

φ_k^{κ} – конечная абсолютная влажность материала;

y – вектор выхода;

Q – критерий потерь качества и производительности процесса;

c_1, c_2 – весовые коэффициенты, отражающие степени значимости соответственно качества и производительности в решаемой задаче;

b_0, b_1 – параметры параболической (второго порядка) функции;

a_0, a_1 – параметры линейной функции;

$h(\cdot)$ – возможные траектории изменения влажности по длине аппарата;

t_n^m – момент времени определения влажности m-ой партии материала в n камере;

A_n – массив параметров модели для определения влажности материала в центре n лимитирующей камеры;

u_n – векторы управляющих воздействий;

x_n – векторы возмущающих воздействий;

$U_n^{\text{доп}}$ – область допустимых значений управляющих воздействий n-ой лимитирующей камеры;

$Y_n^{\text{доп}}$ – область допустимых значений влажности в n-ой лимитирующей камере сушильной установки;

Q_n – минимизируемый функционал потерь качества и производительности;

u_n^* – корректирующее воздействие;

R – массив параметров задачи;

t_{n+1}^m, $t_{\text{к}}^m$ – моменты времени определения влажности m-ой партии материала в $n+1$ лимитирующей и конечной камерах соответственно;

A_{n+1} – массив параметров модели для расчета влажности в $n+1$ лимитирующей камере;

$K_{\text{амп}}^{\text{н}}$, $K_{\text{оф}}^{\text{н}}$ – амплитудный и офсетный коэффициенты нормализации;

$w_{i,j}^{(n)}$, $w_j^{(n\text{ вых})}$ – весовые коэффициенты связей нейронов;

N_i – число нейронов в скрытом слое нейронной сети;

$\overline{\varphi_i}$ – нормализованное значение влажности материала;

$\overline{x_1}$ – нормализованное значение начальной влажности материала;

$\overline{x_2}$, $\overline{x_3}$ – нормализованные значения температуры и влажности окружающей среды;

$\overline{x_4}$ – нормализованное значение скорости движения пластинчатого конвейера;

$\overline{x_5}$ – нормализованное значение наличия или отсутствия ворошителя;

$\overline{x_6}$ – нормализованное значение процента времени работы вытяжного вентилятора;

$\overline{x_7}$, $\overline{x_8}$ – нормализованные значения температуры и влажности сушильного агента;

$\overline{x_9}$, $\overline{x_{10}}$ – нормализованные значения процента открытия воздухозаборного окна и сбросного шибера;

φ_i – значение влажности в натуральном масштабе;

$K_{\text{амп}}^{\text{дн}}, K_{\text{оф}}^{\text{дн}}$ – амплитудный и офсетный коэффициенты денормализации;

$\mathcal{A}$ – событие «процесс сушки завершится хорошо»;

$\mathcal{B}$ – событие «процесс сушки завершится удовлетворительно»;

C – событие «процесс сушки завершится плохо»;

$\mathcal{Q}$ – взаимоисключающее событие;

a_h и b_h – параметры объекта управления в состоянии h;

$z(t)$ – фазовые координаты;

$u(t)$ – управляющее воздействие;

$w(t)$ – шум в канале управления;

$u_{\text{н}}, u_{\text{в}}, w_{н}, w_{в}$ – границы изменения управляющего воздействия и шума;

w_i, v_i – «белые» или «цветные» шумы в каналах управления и измерения с нулевыми средними и среднеквадратическими отклонениями σ_w и σ_v соответственно;

F, G, a, b – параметры модели динамики объекта;

$J_э$ – минимизируемый функционал (затраты энергии);

L, A – синтезирующие переменные;

$\delta_i^{(1)}, \delta_i^{(2)}$ – задаваемые отклонения значения влажности материала от требуемой по регламенту;

$\tilde{u}^*(\cdot)$ – оптимальная программа управления;

$\overline{w}$ – математическое ожидание w_i,

$N_в$ – объем выборки;

P_i – дисперсия ошибок фильтрации;

$u_k^{*}{}_{ад}(t)$ – адаптивное управление;

$u_k{}^{pz}(t)$ – позиционное управление,

$u_k{}^{pr}(t)$ – программное управление;

c – весовой коэффициент;

Φ_n – лингвистическая переменная «влажность материала на выходе n камеры»;

Φ_{n+1} – лингвистическая переменная «влажность материала на выходе $n+1$ камеры»;

$\mathrm{M}_\mathrm{k}^\mathrm{к}$ – лингвистическая переменная «мера доверия к качеству выпускаемого материала»;

$U^{сл}$ – лингвистическая переменная «скорость движения пластинчатого конвейера»;

G_0 – класс безотказной работы датчиков ИДВ;

G_1 – класс мягких отказов датчиков ИДВ;

G_2 – класс средних отказов датчиков ИДВ;

G_3 – класс жестких отказов датчиков ИДВ.

η – номер объекта;

ρ – параметр прогнозирующей модели;

σ_w^2 – дисперсия w_i;

γ^* – оптимальный вариант архитектуры ИИУС ТТА;

$\gamma^{\text{У}}, \gamma^{\text{И}}$ – количество различных вариантов ИУПС и ИИПС;

δt – число шагов;

λ_i, ρ_i – возмущающие воздействия со стороны соседних камер СВЛ слева и справа;

μ_i – модель *i*-ой камеры;

χ – допустимая область изменения траекторий фазовых координат;

Θ – число входов нейронной сети для расчета влажности $\varphi_i^{\text{к}}$ в i-ой камере;

$\theta_j^{(i)}$ – сдвиги сигмоидальных активационных функций нейронов скрытого слоя нейронной сети;

$\theta_{\text{вых}}^{(i)}$ – сдвиг сигмоидальной активационной функции нейрона выходного слоя нейронной сети;

$\beta_j^{(i)}$ – углы наклона сигмоидальных активационных функций нейронов скрытого слоя нейронной сети;

$\beta_{\text{вых}}^{(i)}$ – угол наклона сигмоидальной активационной функции нейрона выходного слоя нейронной сети;

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов / О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров [и др.]; под ред. О.В. Алексеева. – М.: Высш. шк., 2001. – 479 с.

2. Аджиев, М.Э. Энергосберегающие технологии / М.Э. Аджиев.– М., 1990. – 64 с.

3. Акиндинов, В.В. Способ измерения влажности материалов на конвейере и устройство для его осуществления / В.В.Акиндинов, С.М. Еремин, В.Н.Стрельников, Ю.А.Тен. – РОСПАТЕНТ. Свид. № 93040316 от 20.12.1995.

4. Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях / под ред. М.И. Нечепуренко. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990.– 234 с.

5. Александров, А.Г. Оптимальные и адаптивные системы / А.Г. Александров. – М.: Высш. шк., 1989. – 263 с.

6. Алексеев, В.М. Оптимальное управление / В.М. Алексеев, В.М. Тихомиров, С.В. Фомин. – М.: Наука, 1979. – 432 с.

7. Алиев, Т.А. Алгоритм определения дисперсии помехи случайных сигналов. / Т.А. Алиев, Н.Ф. Мусаева // Приборы и системы управления. – 1997. – № 12. – С. 33-34.

8. Андреев, Н.И. Теория статистически оптимальных систем управления / Н.И.Андреев. – М.: Наука, 1980. – 416 с.

9. Андрейчиков, А.В. Интеллектуальные информационные системы: учеб. / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 424 с.

10. Аоки, М. Оптимизация стохастических систем / М. Аоки; пер. с англ. Е.П. Маслова и Э.П. Маплельбаума; под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1971. - 429 с.

11. Аракелов, В.Е. Методические вопросы экономии энергоресурсов / В.Е. Аракелов, А.И. Кремер. – М.; Энергоатомиздат, 1990. – 188 с.

12. Артемов, А.А. К вопросу существования решения задачи энергосберегающего управления в условиях помех / А.А. Артемов, С.В. Артемова, А.Н. Грибков // Общие проблемы управления и их приложения. Проблемы преподавания информатики (ОПУ-2003): материалы междунар. конф. – Тамбов, 2003. – Т. 8, вып. 3. – С. 341.

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

14. 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: II Всероссийская (VII Тамбовская межвузовская) науч.- практ. конф., ТГУ,4-5 сентября 2003. - Тамбов, 2003.– С. 5-8.

15. 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.

16. 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.

17. Артемова, С.В. Виртуальный датчик влажности пастообразных красителей на основе нейронной сети / С.В. Артемова, А.Н. Грибков, А.Е. Ерышов, А.М. Каменский // Информационные процессы и управление [Электронный ресурс]. – 2008. - № 2. – С. 2- 4.- Загл. с экрана.- Режим доступа: www.tstu.ru/ipu/2008-3/025.pdf (166390 bytes).

18. 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.

19. 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; М.; СПб; Баку; Вена, 2005.– Вып. 3.– С. 142-145.

20. Артемова, С.В. Интеллектуальная система управления тепло-технологическими аппаратами / С.В. Артемова, П.А. Подхватилин // Materiały IX Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki - 2013» Volume 30.Techniczne nauki. Budownictwo i architektura.: Przemyśl.Nauka i studia. – 2013. – С.73-75.

21. 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.

22. Артемова, С.В. 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

23. Артемова, С.В. Информационная система оптимального управления тепло-технологическими аппаратами: монография / С.В. Артемова. – М.; СПб; Вена; Гамбург: Изд-во МИНЦ, 2011.– 234 с.

24. Артемова, С.В. Информационная технология анализа и синтеза энергосберегающего управления с использованием нечеткой логики / С.В.Артемова, А.Н.Грибков // Информационные системы и процессы: сб. науч. тр. – Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена, 2003. – С. 165-169.

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. – Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена, 2004. – С. 48-52.

26. Артемова, С.В. Информационная технология проектирования энергосберегающих помехоустойчивых регуляторов / С.В. Артемова, Д.Ю.

Муромцев, А.Н. Грибков // VIII научная конференция ТГТУ. – Тамбов, 2003. – С. 117-118.

27. 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. – Тамбов, 2002. – С. 9-11.

28. Артемова, С.В. Информационная технология энергосберегающего управления объектами в условиях помех / С.В.Артемова, Д.Ю. Муромцев, А.Н.Грибков // Машиностроительные технологии`04: IV Междунар. конгресс, Варна, Болгария. – Варна, 2004. – С. 127-129.

29. 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. – Тамбов, 2003. – С. 91-93.

30. Артемова, С.В. К вопросу существования решения задачи энергосберегающего управления в условиях помех / С.В. Артемова, А.Н. Грибков, А.А. Артемов // Общие проблемы управления и их приложения. Проблемы преподавания математики (ОПУ-2003): Междунар. конф., 11-16 мая. – Тамбов, 2003. – С. 8-9.

31. 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.

32. Артемова, С.В. Математическая модель технологической установки термообработки магнитопроводов ТОМ-1 на множестве состояний функционтрованя / С.В. Артемова // Труды Тамбовского государственного технического университета: сб. науч. ст. молодых ученых и студентов.– Тамбов, 2000.– Вып. 5. - С.38-41.

33. Артемова, С.В. Математическое описание и расчет процесса разогрева промышленных электропечей / С.В. Артемова, В.И. Ляшков // Труды

Тамбовского государственного технического университета: сб. науч. ст. - Тамбов, 1998.– С. 65-73.

34. Артемова, С.В. Микропроцессорная система мониторинга влажности пастообразных материалов/ С.В. Артемова, А.С. Назаров, П.А. Подхватилин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского.- 2011.– Спец. выпуск (36).- С. 7–12.

35. 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, 2007. – Ч. 2. - С. 144-147.

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

37. Артемова, С.В. 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.

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

39. Артемова, С.В. Программа поддержки принятия решений, созданная с использованием CASE-технологии / С.В.Артемова, А.Н. Грибков // VIII научная конференция ТГТУ. – Тамбов, 2003. – С. 116-117.

40. 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.

41. 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 Тамбовского государственного технического университета: сб. науч. ст. – Тамбов, 1998.– С. 59-65.

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

43. 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.

44. 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.

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

46. Артемова, С.В. Энергосберегающее управление одним классом нелинейных объектов / С.В. Артемова, Д.Ю. Муромцев // Труды Тамбовского государственного технического университета: сб. науч. ст.- Тамбов, 1997.– С. 194-197.

47. 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, 1997.– С. 243–244.

48. Артемова, С.В. Энергосберегающее управление процессом разогрева реактора с индукционным обогревом / С.В. Артемова, А.В. Неретин // Вестник

Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки.– 1999.– Т. 4, вып. 4.– С. 489–491.

49. 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.

50. Артемьев, В.М. Теория динамических систем со случайными изменениями структуры / В.М. Артемьев. – М.: Высш. шк., 1970. – 160 с.

51. Астанин, Л.Ю. Применение программируемых калькуляторов для инженерных и научных расчетов / Л.Ю. Астанин, Ю.Д. Дорский, А.А. Костылев. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.

52. Атанс, М. Оптимальное управление: пер. с англ. / М.Атанс, П.Л. Фалб. – М.: Мир, 1968. – 764 с.

53. Атогин, В.В. Машинное проектирование оптимальных систем управления производственно-распределенными динамическими объектами / В.В. Атогин, М.З. Згуревский. – Киев: Выща шк., 1985. – 170 с.

54. Балакришнан, А. Теория фильтрации Калмана / А. Балакришнан. – М.: Мир, 1988. – 168 с.

55. Баумштейн, И.П. Автоматизация процессов сушки в химической промышленности / И.П. Баумштейн, Ю.А. Майзель. – М.: Химия, 1970. – 232 с.

56. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р.Беллман. – М.: Изд-во иностр. лит, 1960. – 400 с.

57. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: Наука, 1965. – 458 с.

58. Бессонов, А.Н. Методы и средства идентификации динамических объектов / А.Н. Бессонов, Ю.В. Загашвили, А.С. Маркелов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 300 с.

59. Бодров, В.И. Оптимизация статических режимов работы воздухоразделительных установок низкого давления при переменном

потреблении продуктов разделения / В.И. Бодров, Ю.В. Кулаков, В.Н. Шамкин // Химическая промышленность. – 1993. – № 1-2. – С. 66-71.

60. Бодров, В.И. Метод решения задач оптимального управления в классе нечетких множеств / В.И. Бодров, Ю.Ю. Громов, В.Г. Матвейкин. – Тамбов: Изд-во ТИХМ, 1988. – 6 с.

61. Бодров, В.И. Оптимизация режимов работы воздухоразделительной установки низкого давления при переменном потреблении продуктов разделения / В.И. Бодров, Ю.В. Кулаков, В.Н. Шамкин // Холод - народному хозяйству: тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Л.: ЛТИХП, 1991. – С. 16.

62. Божко, А.Н. Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью / А.Н. Божко, А.Ч. Толпаров // Наука и образование. –2004.- № 5 – Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/44191.html.

63. Браго, Е.Н. Нейросетевая модель для измерения расходов в многофазном потоке / Е.Н. Браго, Д.Н. Великанов, В.В. Южанин // Датчики и системы. – 2007. – № 10. – С. 21-24.

64. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю Ши. – М.: Мир, 1972. – 544 с.

65. Браммер, К. Фильтр Калмана-Бьюси / К.Браммер, Г.Зиффинг. – М.: Наука, 1982. – 210 с.

66. Бриллинджер, Д.Р. Временные ряды: Обработка данных и теория / Д.Р. Бриллинджер. – М., 1980. – 536 с.

67. Бублик, Б.Н. Минимаксные оценки и регуляторы в динамических системах / Б.Н. Бублик, Н.Ф. Кириченко, А.Г. Наконечный. – Киев: ИК АН УССР, 1978. – 48 с.

68. Бутковский, А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975. – 568 с.

69. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов / Е.С. Вентцель. – 5-е изд. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.

70. Веселовский, В.С. Нагревательные приборы в лабораторной практике / В.С. Веселовский, И.В. Шманенков, Е.В. Носачев. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим.. лит, 1951. – 230 с.

71. Виглеб, Г. Датчики: пер. с нем. / Г. Виглеб. – М.: Мир, 1989. – 196 с.: ил.

72. Воинов, Б.С. Информационные технологии и системы: поиск оптимальных, оригинальных и рациональных решений. Второе дополненное электронное издание: в 2 т. Т.1: Методология синтеза новых решений / Б.С. Воинов, В.Н. Бугров, Б.Б. Воинов. – М.: Наука, 2007.- 730 с.

73. Воронов, А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем / А.А. Воронов. – М.: Наука, 1985. – 315 с.

74. Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.

75. Гальчук, Л.И. Фильтрация марковских процессов со скачками / Л.И.Гальчук // Успехи математических наук. – 1970. – № 25. – С. 237-238.

76. Гаскаров, Д.В. Интеллектуальные информационные системы: учеб. для вузов.– М.: Высш. шк., 2003. – 431 с.

77. Геловани, В.А. Системный подход в задачах интеграции интеллектуальных систем / В.А. Геловани, В.Б. Бритков // Интеллектуальные системы и технологии. Научная сессия МИФИ - 2000. – М., 2000.-

78. Геловани, В.А. Системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием современной информационной технологии / В.А. Геловани, В.Б. Бритков // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 1995-1996. – М., 1996. – С. 179-190.

79. Герасимяк, Р.П. Динамика асинхронных элетроприводов крановых механизмов / Р.П. Герасимяк. – М: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.

80. Голдовский, Б.И. Рациональное творчество / Б.И. Голдовский, М.И. Вайнерман – М.: Речной транспорт, 1990.- 120 с.

81. ГОСТ 8.437-81. Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения. – Введен 1982–07–01. М.:Изд-во стандартов 1987.– 10 с.

82. ГОСТ Р 50596-93. Система информационно-управляющая для обеспечения технической эксплуатации воздушных судов. Введен 1994–01–07. М.:Изд-во стандартов 1987.– 19 с.

83. Грабауров, В.А. Информационные технологии для менеджеров / В.А.Грабауров. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

84. Грибков, А.Н. Алгоритм ресурсосберегающего управления динамическими режимами многосекционных сушильных установок /А.Н. Грибков, С.В. Артемова // Известия Томского политехн. ун-та.– 2008.- Т. 313, № 4.– С. 48–50.

85. 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.

86. 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.

87. 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 .

88. Программный модуль полного анализа оптимального управления MIMO-системами / А.Н. Грибков, С.В. Артемова, И.А. Куркин, И.С. Базылюк // Информационные процессы и управление [Электронный ресурс].– 2008.- № 2.– С. 74-76.- Загл. с экрана.- Режим доступа: www.tstu.ru/ipu/2008-3/034.pdf (176613 bytes).

89. Гришин, Ю.П. Динамические системы, устойчивые к отказам / Ю.П. Гришин, Ю.М. Казаринов. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.

90. Грошев, В.Н. 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.

91. Гудвин, Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ: Лабор. знаний, 2004. – 911 с.

92. Макетирование, проектирование и реализация диалоговых информационных систем / Л.И.Гуков, Е.И.Ломако, А.В. Морозова [и др.]. – М.: Финансы и статистика, 1993. – 320 с.

93. Гулько, Ф.Б. Решение нестационарных задач фильтрации и упреждения при произвольной помехе методами моделирования / Ф.Б. Гулько, Ж.А.Новосельцева // Автоматика и телемеханика. – 1966. – № 10. – С. 153-168.

94. Гэри, М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д .Джонсон. – М.: Мир, 1982.- 416 с.

95. Данилов, О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке / О.Л. Данилов, Б.И. Леончик. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.

96. Датчики влажности [Электронный ресурс].- Загл. с экрана.- Режим доступа: http://www.sensorelement.com/humidity/818%20humidity.pdf].- 24.11.2007.

97. Демин, Н.С. Оценивание и классификация случайных процессов по совокупности непрерывных и дискретных наблюдений / Н.С. Демин // Известия Академии наук СССР. Техн. кибернетика. – 1979. – № 1. – С. 153-160.

98. Денисенко, В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с.

99. Евгенев, Г.Б. Системология инженерных знаний / Г.Б. Евгенев. – М.: Изд-во МГТУ, 2001.- 334 с.

100. Егоров, А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами / А.И.Егоров – М.: Наука, 1978. – 464 с.

101. Егоров, А.И. Основы теории управления / А.И. Егоров. – М.: Физматлит, 2004. – 504 с.

102. Жандаров, А.М. Идентификация и фильтрация измерений состояния стохастических систем / А.М.Жандаров. – М.: Наука, 1979.–112 с.

103. Забелло, Л.Е. К теории управляемости линейных нестационарных систем / Л.Е.К. Забелло // Дифференциальные уравнения. – 1973. – Т. IX, № 3. – С. 563-564.

104. Ивахненко, А.Г. Предсказание случайных процессов / А.Г. Ивахненко, В.Г. Лапа. – Киев: Наукова думка, 1971. – 416 с.

105. Измерители влажности. Классификация по методам измерений [Электронный ресурс].- Загл. с экрана.- Режим доступа: http://www.interpribor.ru/vlag_klass.php].- 13.02.2006.

106. Измеритель влажности и содержания органических веществ ТМ710 [Электронный ресурс].- Загл. с экрана.- Режим доступа: http://www.tmking.ru/items/ 017167/html.- 21.02.2007.

107. Измеритель влажности и содержания органических веществ ММ710. [Электронный ресурс].- Загл. с экрана.- Режим доступа: http://www.promtex.ru/catalprod/ ndc_infrared_engineering/mm710.- 21.02.2007.

108. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды / В.А. Геловани, А.А. Башлыков, В.Б. Бритков, Е.Д. Вязимов. - М.: Эдиториал УРСС, 2001. - 304 с.

109. Информационные технологии при решении задач моделирования и управления: метод. указ. / сост.: С.В.Артемова, Д.Ю.Муромцев [и др.]. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2000. - 35 с.

110. Информационные технологии управления: учеб. пособие / под ред. Ю.М. Черкасова. – М.: ИНФРА-М, 2001. – 216 с.

111. Информационные технологии управления: учеб. пособие для вузов / под ред. Г.А.Титоренко. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. - 439 с.

112. Казаков, И.Е. Оптимизация динамических систем случайной структуры / И.Е. Казаков, В.М. Артемьев. – М.: Наука, 1980. – 331 с.

113. Казаков, И.Е. Статистическая теория систем управления в пространстве состояний / И.Е.Казаков. – М.: Наука, 1975. – 432 с.

114. Казанцев, Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 386 с.

115. Кандрашина, Е.Ю. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / Е.Ю. Кандрашина, Л.В. Литвинцева, Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 2000. – 328 с.

116. Карапетян, Р.М. Алгоритмы оценки качества и синтеза линейных систем управления / Р.М. Карапетян. – Рига: ЛПР ВНТОМ, 1989. – 52 с.

117. Карпова, Т.С. Базы данных: модели, разработка, реализация / Т.С.Карпова. – СПб.: Питер, 2002. – 304 с.

118. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.

119. Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В.Кафаров. – М.: Химия, 1971. – 46 с.

120. Кафаров, В.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Л.В. Гурьева. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.

121. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М.: Наука, 1976. – 499 с.

122. Кватрани, Т. Визуальное моделирование с помощью Rational Rose 2002 и UML / Т. Кватрани. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. – 192 с.

123. Кендалл, М. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М. Кендалл, А. Стьюарт. – М.: Наука, 1976. – 736 с.

124. Кириченко, Н.Ф. Минимаксные рекуррентные оценки параметров динамических систем / Н.Ф. Кириченко, А.Г. Наконечный, В.А. Навродский // Доклады Академии наук УССР. – 1978. – № 11. – С. 1021-1026.

125. Кицул, П.И. О непрерывно-дискретной фильтрации марковских процессов диффузионного типа / П.И. Кицул // Автоматика и телемеханика. – 1970. – № 11. – С. 29-37.

126. Ковальски, Р. Логика в решении проблем / Р. Ковальски. – М.: Наука, 1990. – 290 с.

127. Коздоба, Л.А. Классификация задач и методов оптимизации тепловых процессов / Л.А. Коздоба // Промышленная теплотехника. – 1987. – Т. 9, № 2. - С. 52-62.

128. Колмановский, В.Б. Оптимальное управление линейными системами при непрерывных и дискретных наблюдениях / В.Б. Колмановский // Прикладная механика. – 1973. – Т. 9, № 6.- С. … - … .

129. Колмогоров, А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей / А.Н.Колмогоров // Известия Академии наук СССР. Сер. Математика. – 1941. – Т. 5, № 1. – С. 3-14.

130. Кольтюков, Н.А. Применение прогнозирующей модели в системе оптимального энергосберегающего управления резиносмесителем / Н.А. Кольтюков, С.В. Артемова, А.Н. Грибков // Труды Тамбовского государственного технического университета: сб. науч. ст. – Тамбов, 2002.– Вып. 11.- С. 65-69.

131. Коновалов, В.И. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / В.И. Коновалов, А.М. Коваль. – М.: Химия, 1989. – 224 с.

132. Корнеева, А.И. Тенденция развития системной автоматизации технологических процессов / А.И. Корнеева // Приборы и системы управления. – 1998. – № 8. – С. 51-56.

133. Корсунов, Н.И. Решение задач теплопроводности с использованием нейросетевых компьютерных технологий / Н.И. Корсунов, А.А. Юдин // Информационные технологии. – 2008. – № 1. – С. 6-15.

134. Красовский, А.А. Статическая теория переходных процессов в системах управления / А.А. Красовский. – М.: Наука, 1968. - 417 с.

135. Красовский, А.А. Справочник по теории автоматического управления / А.А. Красовский. - М.: Физ. мат. лит., 1987. - 712 с.

136. Красовский, А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами / А.А. Красовский, В.Н. Буков, В.С. Шендрик . – М.: Наука, 1977. – 272 с.

137. Красовский, А.А. Фазовое пространство и статическая теория динамических систем / А.А. Красовский. – М., 1974. - 232 с.

138. Красовский, Н.Н. Теория оптимальных управляемых систем / Н.Н. Красовский // Механика в СССР за 50 лет: сб. – М., 1968. – С. 179 - 244.

139. Красовский, Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.

140. Кремер, Н.Ш. Эконометрика: учеб. для вузов / Н.Ш. Кремер, Б.А. Путко. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 311 с.

141. Кренке, Д. Теория и практика построения баз данных / Д.Кренке. – 8-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 800 с.

142. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.

143. Кудинов, Ю.И. Нечеткие модели динамических процессов: монография / Ю.И. Кудинов, И.Ю. Кудинов, С.Х. Суслова. – М.: Научная книга, 2007. – 184 с.

144. Методы анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем / Н.А. Кузнецов, В.В. Кульба, С.С. Ковалевский, С.А. Косяченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 800 с.

145. Куржанский, А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности / А.Б. Куржанский. – М.: Наука, 1977. – 392 с.

146. Куржанский, А.Б. Управление и оценивание параметров в системах с распределенными параметрами / А.Б. Куржанский, Ю.С. Осипов // Труды VI конгресса ИФАК. – Бостон, 1973.- С. 257 - 287.

147. Кутателадзе, С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.

148. Куцевич, Н.А. SCADA-системы. Взгляд со стороны / Н.А. Куцевич // PCWeek. – 1999. – № 33. – С. 11-17.

149. Лейтман, Дж. Введение в теорию оптимального управления / Дж. Лейтман. – М.: Наука, 1968. – 192 с.

150. Леоненков, А.В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ. Петербург, 2003. - 736 с.

151. Ли, Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление / Р.Ли. – М.: Наука, 1966. – 176 с.

152. Лившиц, Н.А. Линейная фильтрация при особенной матрице интенсивностей помех / Н.А. Лившиц, В.Н. Виноградов, Г.А. Голубев // Техническая кибернетика. – 1969. – № 3. – С. 127-135.

153. Липцер, Р.Ш. Уравнения почти оптимального фильтра Калмана при особенной матрице ковариаций шума в наблюдениях / Р.Ш.Липцер // Автоматика и телемеханика. – 1974. – № 1. – С. 35-41.

154. Лисиенко, В.Г. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах / В.Г. Лисиенко, В.В. Волков, А.Л. Гончаров. – Киев: Наук. Думка, 1984. – 232 с.

155. Лыков, М.В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М.: Химия, 1970. - 432 с.

156. Лэннинг, Дж. Случайные процессы в задачах автоматического управления / Дж. Лэннинг, Р. Бэттин. – М.: Изд-во иностр. лит., 1958.- 388 с.

157. Любарский, Ю.Я. Интеллектуальные информационные системы / Ю.Я. Любарский. – М.: Наука, 1980. - 232 с.

158. Любарский, Ю.Я. Диалоговые системы в диспетчерском управлении энергосистемами / Ю.Я.Любарский, В.Г. Орлов.– М.: Энергоиздат, 1987.– 150 с.

159. Люггер, Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Дж.Ф. Люггер. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. – 864 с.

160. Ляпин, Л.Н. Анализ и оперативный синтез оптимального управления в задаче двойного интегратора на множестве состояний функционирования / Л.Н.

Ляпин, Ю.Л. Муромцев // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика.– 1990.- № 3.- С. 45 - 48 .

161. Ляпин, Л.Н. Оптимальный по минимуму затрат регулятор объекта двойного интегрирования / Л.Н. Ляпин, Ю.Л. Муромцев, О.В. Попова // Техническая кибернетика. – 1992. – № 2. – С. 19-22.

162. Ляшко, И.И. О задаче фильтрации при наличии цветного шума / И.И. Ляшко, В.П. Диденко, И.В. Колос // Доклады Академии наук УССР. Сер. А. – 1977. – №8. – С. 744-747.

163. Ляшко, И.И. Фильтрация шумов / И.И. Ляшко, В.П. Диденко, О.Е. Цитрицкий. – Киев: Наук. Думка, 1979. – 232 с.

164. Маклаков, С.В. BPwin и Erwin. CASE-средства разработки информационных систем / С.В.Маклаков. – М.: Диалог-МИФИ, 2001. – 304 с.

165. Маклаков, С.В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite / С.В.Маклаков. – М.: Диалог-МИФИ, 2004. – 432 с.

166. Малпас, Дж. Реляционный язык и его применение / Дж.Малпас. – М.: Наука, 1990. – 464 с.

167. Марковский, А.В. Технология идентификации и моделирования сложных нелинейных динамических систем / А.В.Марковский, В.Д. Чалый // Приборы и системы управления. – 1998. – № 9. – С. 10-12.

168. Мастрюков, Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей / Б.С. Мастрюков. – М.: Металлургия, 1972. – 368 с.

169. Мастрюков, Б.С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. Т.2 Расчеты металлургических печей / Б.С. Мастрюков.– М.: Металлургия, 1978. – 272 с.

170. Медич, Д. Статистические оптимальные линейные оценки и управление / Д.Медич. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.

171. Медич, Д. Методы оптимизации в статистических задачах управления / Д. Медич [и др.]. – М.: Машиностроение, 1974.– 240 с.

172. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. - М.: Мир, 1973. – 340 с.

173. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб.: в 5 т. Т.4: Теория оптимизации систем автоматического управления / под ред. К.А.Пупкова, Н.Д.Егупова. – 2-е изд. перераб. и доп.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. - 656 с.

174. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учеб. / под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. – 744 с.

175. Микони, С.В. Модели и базы знаний / С.В.Микони. – СПб.: СПГУПС, 2000. – 155 с.

176. Милютин, А.А. Принцип максимума в общей задаче оптимального управления / А.А.Милютин. – М., 2001. – 303 с.

177. Минский, М. Фреймы для представления знаний: пер. с англ. / М.Минский. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

178. Рациональное использование топлива и энергии в промышленности / В.В. Михайлов [и др.]. – М., 1978. – 224 с.

179. Влияние режимов работы элекропечи на старение и срок службы корборундовых нагревателей / Е.И. Могилевский [и др.] // Элекротермия. – 1969. – Вып. 82. – С. 25-27.

180. Муромцев, Д.Ю. Методы и алгоритмы синтеза энергосберегающего управления технологическими объектами: моногр.– Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена: Нобелистика, 2005. – 202 с.: ил.

181. Муромцев, Ю.Л. Включаемость сложных систем / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин // Сб. тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та систем. исслед. – М., 1988. – Вып.14. – С. 14–25.

182. Муромцев, Ю.Л. Интеллектуальный энергосберегающий контроллер / Ю.Л. Муромцев, В.В. Орлов // Математическое моделирование информационных и технологических систем: сб. науч. тр. – Воронеж, 2000. – Вып.4. – С. 93-96.

183. Муромцев, Ю.Л. Информационные технологии проектирования РЭС. Ч.1: Основные понятия, архитектура, принципы: учеб. пособие / Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова, Д.Ю. Муромцев. – Тамбов: Изд-воТГТУ, 2004. – 96 с.

184. Микропроцессорные системы оптимального управления: учеб. пособие / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, В.В. Качкин, Е.В. Сатина; Тамбов. ин-т хим. машиностр. – Тамбов, 1990. – 93 с.

185. Муромцев, Ю.Л. Моделирование и оптимизация сложных систем при изменениях состояния функционирования / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, О.В. Попова. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1993. – 164 с.

186. Применение экспертной системы для анализа и синтеза оптимального управления технологическими процессами / Ю.Л. Муромцев, С.В. Артемова, С.Б. Ушанев, Н.Г. Чернышов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 1997. – № 1. – С. 12-15.

187. Муромцев, Ю.Л. Энергосберегающее управление в условиях помех / Ю.Л. Муромцев, С.В. Артемова, А.Н. Грибко // Энергосбережение–теория и практика: Первая Всерос. шк.-семинар.– М., 2002.- С. 49–53.

188. Мухамедяров, Р.Д. Способ измерения влажности / Р.Д. Мухамедяров, Р.И.Харисов. – РОСПАТЕНТ. Свид. № 2002131200 от 10.05.2004.

189. Наконечный, А.Г. Минимаксная оценка состояний линейных стохастических систем / А.Г.Наконечный // Теория вероятностей и ее применение. – 1978. – Вып.2.- С. 143 - 145.

190. Небылов, А.В. Гарантирование точности управления / А.В. Небылов. – М.: Наука: Физматлит, 1998.- 304 с.

191. Нейтронный влагомерплотномер проб сыпучих материалов НВП05 [Электронный ресурс].- Загл. с экрана.- Режим доступа: http://inri.tpu.ru/pub/nvp05.html].- 20.02.2007.

192. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. — М.: Мир, 1986. — 312 с.

193. Нильсон, Н. Принципы искусственного интеллекта / Н. Нильсон. – М.: Радио и связь, 1985. – 373 с.

194. Новиков, И.И. Прикладная термодинамика и теплопередача / И.И. Новиков, К.Д. Воскресенский. – М.: Атомиздат, 1977. – 352 с.

195. Ногин, В.Д. Основы теории оптимизации: учеб. пособие для студентов вузов / В.Д. Ногин, И.О. Протодьяконов, И.И. Евлампиев; под ред. И.О. Протодьяконова. – М.: Высш. шк., 1986. – 384 с.

196. Норенков, И. П. Генетические методы структурного синтеза проектных решений / И.П. Норенков // Информационные технологии. – 1998. – № 1. – С. 9-13

197. Норенков, И.П. Автоматизированное проектирование / И.П. Норенков. – М.: МГТУ им. Баумана, 2009.- 430 с.

198. Норенков, И.П. Смешанный эволюционный метод / И.П.Норенков, Н.М.Арутюнян // Информационные технологии. 2007. - № 1. - С. 17-20.

199. Ньютон, Д. Теория линейных следящих систем. Аналитические методы расчета / Д. Ньютон, Л. Гулд, Д. Кайзер. – М.: Физматгиз, 1961.- 407 с.

200. Олейников, В.А. Основы оптимального и экстремального управления: учеб. пособие для студентов вузов / В.А. Олейников, Н.С. Зотов, А.М. Пришвин. – М.: Высш. шк., 1969. – 296 с.

201. Орлов, С.А. Технологии разработки программного обеспечения / С.А.Орлов. – СПб.: Питер, 2002. – 464 с.

202. 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, 1995.– С. 243–244.

203. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский; пер. с польского И.Д. Рудницкого. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.: ил.

204. Острем, К. Введение в стохастическую теорию управления / К. Острем. – М.: Мир, 1973. – 324 с.

205. Осуга, С. Обработка знаний: пер с япон. / С. Осуга. – М.: Мир, 1989. – 293 с.

206. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы / Р. Отнес. – М.: Мир, 1982. – 383 с.

207. Павлов, В.Г. К построению некоторых инвариантных решений управления Беллмана / В.Г. Павлов, В.П. Чепрасов // Автоматика и телемеханика. – 1968. – № 1. – С. 53-57.

208. Параев, Ю.И. Введение в статистическую динамику процессов управления и фильтрации / Ю.И.Параев. – М.: Сов. Радио, 1976. – 184 с.

209. 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 ; опубл. 27.08.11. Бюл. № 7. – 15 с.

210. 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 ; опубл. 10.03.12. Бюл. № 7. – 16 с.

211. Половинкин, А.И. Основы инженерного творчества / А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988.- 363 с.

212. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С.Понтрягин, В.Г.Болтянский, Р.В.Гамкрелидзе, Е.В.Мищенко. – М.: Физматгиз, 1969. – 384 с.

213. Поспелов, Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления / Д.А. Поспелов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 231 с.

214. Поспелов, Д.А. Ситуационное управление: теория и практика / Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1986.- 285 с.

215. Способ измерения влажности потоков дисперсных слабопроводящих материалов и устройство для его реализации / С.А. Потапов, В.С.Титов, И.Е.Чернецкая, Д.С.Потапов. – РОСПАТЕНТ. Свид. № 2002133988 от 10.07.2004.

216. Преставление и использование знаний: пер. с англ. / под ред. Ф. Хейес-Рота, Д. Уотермена, Д. Лената. – М.: Мир, 1987. - 441 с.

217. Прикладные нечеткие системы: пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи [и др.]; под ред. Т. Терано, К. Асаи, М. Сугено. – М.: Мир, 1993. – 368 с.

218. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справ. / под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. - 632 с. – (Теплоэнергетика и теплотехника; кн.4).

219. Пупков, К.А. Интеллектуальные системы / К.А. Пупков, В.Г. Коньков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 348 с.

220. Пяткин, А.М., Экономия энергоресурсов: резервы и факторы эффективности / А.М. Пяткин, И.А. Шадрухин. - М.: Знаки, 1982.- 64 с.

221. Рабинович, С.Г. Погрешности измерений / С.Г.Рабинович. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с.

222. Радкевич, В.В. Опыт проектирования и внедрения систем управления / В.В. Радкевич // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – №2. – С. 10-16.

223. Радкевич, В.В. Системы управления объектами газовой промышленности / В.В. Радкевич. – М.: Серебряная нить, 2004. – 440 с.

224. Разработка мероприятий по снижению энергопотребления и повышение эффективности работы вальце-ленточных сушилок в цехах № 1,15: отчет об исследовательской работе. – Тамбов, 2001. – 130 с.

225. Райцын, Т.М. Синтез систем автоматического управления методом направленных графов / Т.М. Райцын. – Л.: Энергия, 1970. – 96 с.

226. Растопов, С.Ф. Способ измерения влажности сыпучих материалов. – РОСПАТЕНТ. Свид. № 2001102972 от 27.10.2003.

227. Резистивные датчики влажности H12K5 [Электронный ресурс].- Загл. с экрана.- Режим доступа: http://www.sensorelement.com/humidity/H12K5.pdf.- 24.11.2006.

228. Резистивные датчики влажности H25K5A [Электронный ресурс].- Загл. с экрана.- Режим доступа: http://www.sensorelement.com/humidity/H25K5A%20spec.pdf].- 24.11.2006.

229. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.

230. Родных, Ю.В. Автоматизированные системы управления химико-технологическими процессами / Ю.В. Родных, М.Р. Тучинский. – М.: НИИТЭхим, 1974. – Вып. 1. – С. 50-65.

231. Романенко, А.Ф. Аппроксимативные методы анализа случайных процессов / А.Ф. Романенко, Г.А. Сергеев. – М.: Энергия, 1974. – 176 с.

232. Сажин, Б.С. Эксергетический метод в химической технологии / Б.С. Сажин, А.П. Булеков. – М.: Химия, 1992. - 208 с.

233. Свенчанский, А.Д. Электрические промышленные печи / А.Д. Свенчанский.- М.: Энергия, 1975.- 400 с.

234. Сейдж, А. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / А. Сейдж, Э. Мелс. – М.: Связь, 1976. – 495 с.

235. Сейдж, Э.П. Оптимальное управление системами / Э.П. Сейдж, Ч.С.Уайт. – М.: Радио и связь, 1982.- 392 с.

236. Скачков, Е.В. Способ определения влажности / Е.В.Скачков, Б.Г. Чистяков, В.С.Яскевич. – РОСПАТЕНТ. Свид. № 2251684 от 11.08.2003.

237. Смирнова, В.И. Проектирование и расчет автоматизированных приводов / В.И. Смирнова, В.И. Разинцев. - М.: Машиностроение, 1990. - 368 с.

238. Современное состояние и тенденция развития тиристорных электроприводов переменного тока для краново-подъемных механизмов / А.Г. Яуре, А.П. Богословский [и др.]. - М.: Информэлектро, 1981.- … с.

239. Спивак, Э.И. Методы ускоренных расчетов нагревательных печей / Э.И.Спивак. – М.: Металлургия, 1988. – 141 с.

240. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987.- 711 с.

241. Степанов, В.С. Анализ энергетического совершенства технологических процессов / В.С. Степанов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 85 с.

242. Субботин, А.И. Оптимизация гарантии в задачах управления / А.И. Субботин, А.Г. Ченцов. - М.: Наука, 1981. - 288 с.

243. Таунсенд, К. Проектирование и программная реализация экспертных систем для персональных ЭВМ: пер. с англ. / К. Таунсенд, Д. Фохт. – М.: Финансы и статастика, 1990.- 320 с.

244. Теория автоматического управления: учеб. для ВУЗов по спец. «Автоматика и телемеханика»: в 2 ч. Ч. 2 Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / А.А.Воронов [и др.]; под ред. А.А.Воронова. – М.: Высш. шк., 1986. – 504 с.

245. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н.Тихонов, А.А.Самарский. – М.: Наука, 1977. – 742 с.

246. Трепалин, С. Профессиональная разработка приложений с помощью Delphi 5 / С. Трепалин // Компьютер Пресс. – 2001. – № 3.- С. … - … .

247. Уинстон, П. Искусственный интеллект / П. Уинстон. – М.: Мир, 1980. – 519 с.

248. Уткин, В.Б. Информационные системы и технологии в экономике: учеб. для вузов / В.Б. Уткин, К.Б. Балдин. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 335 с.

249. Боггс, Уэнди UML и Rational Rose 2002 / Уэнди Боггс, Майкл.– М.: Лори, 2004. – 509 с.

250. Файнштейн, В.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами / В.Г. Файнштейн, Э.Г. Файнштейн; под ред. О.В.Снежановского. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 240 с.

251. Фельдбаум, А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А.А. Фельдбаум. – М.: Физматгиз, 1963.- 553 с.

252. Филиппов, А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью / А.Ф. Филиппов. – М.: Наука, 1985. – 224 с.

253. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / под ред. К.Т. Леондеса. – М.: Мир, 1980. – 408 с.

254. Флюгге-Лотц, Й. Оптимальное управление в некоторых системах угловой ориентации при различных критериях качества / Й. Флюгге-Лотц, Г. Марбах // Техническая механика. – 1963. – № 2. – С. 38-54.

255. Фрадков, А.Л. Адаптивное управление в сложных системах / А.Л. Фрадков. – М.: Наука, 1990. – 292 с.

256. Фролов, С.В. Тенденция развития систем управления технологическими процессами / С.В. Фролов // Приборы и системы управления. - 1996. - № 9. - С. 6.

257. Цалепко, М.Ш. Моделирование семантики в базах данных / М.Ш. Цалепко. – М.: Наука, 1989. – 287 с.

258. Цапенко, М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование: учеб. пособие для вузов / М.П.Цапенко. – 2-е изд., перер. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.

259. Центер, Ф.Г. Проектирование тепловой изоляции электростанций и тепловых сетей / Ф.Г. Центер. – Л.: Энергия, 1972. – 198 с.

260. Черноусько, Ф.Л. Оптимальное управление при случайных возмущениях / Ф.Л. Черноусько, В.Б. Калмановский. – М.: Наука, 1978. – 352 с.

261. 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.

262. Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособ. для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. - М.: Энергия, 1979. - 616 с.

263. Чистов, В.П. Оптимальное управление электрическими приводами / В.П. Чистов, В.Н. Бондаренко, В.А. Святославский. - М.: Энергия, 1968. - 232 с.

264. Шаллоуей, А. Шаблоны проектирования. Новый подход к объектно-ориентированному анализу и проектированию / А. Шаллоуей, Дж.Р. Трот. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2002. – 288 с.

265. Шендрик, В.С. Синтез оптимальных управлений методом прогнозирующей модели / В.С. Шендрик // Доклады Академии наук СССР. – 1975. – Т. 224. – № 3.- С. 561 - 562 .

266. Шлихт, А.Г. Оптимальное оценивание и управление в дискретных системах / А.Г. Шлихт, А.Н. Жирабок. – Владивосток, 1990. – 88 с.

267. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – 684 с.

268. Экспертная система "Энергосберегающее управление динамическими объектами" / Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова, С.В. Артемова, А.В. Федоров, Д.Ю.Муромцев, И.Е.Капитонов. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №950464. Зарегистрирован в РосАПО 19.12.95.

269. Электронный учебник StatSoft [Электронный ресурс].- Загл. с экрана.- Режим доступа: http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm.- 01.11.2007

270. Ятров, С.Н. Энергосберегающие технологии в СССР и за рубежом. Аналитический альбом / С.Н. Ятров. – М., 1991. – 288 с.

271. Яшин, А.И. Условно-гауссовское оценивание характеристик динамических систем по скачкообразным наблюдениям / А.И. Яшин // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 5. – С. 38-47.

272. Bensousan, A. On Approximate Kalman-Bucy filter / A. Bensousan // 4-th Haw. Int. Conf. Syst. Sci. Honolulu (Haw.)– 1971. – P. 462-464.

273. Booton, R.C. An Optimization theory for time-varying linear systems with nonstationary statistical inputs / R.C. Booton // Proc. IRE. – 1952. – V. 40. – P. 977-981.

274. Brown, R.G. Statistical forecasting for inventory control / R.G. Brown. – N.Y.: McGrow Hill, 1959.

275. Brown, R.G. The fundamental theory of exponential smoothing. / R.G.Brown, R.F.Meyer. – Opus. Res., 1961.

276. Bryson, A.E.Jr. Linear filtering for time-varying systems using measurements containing coloured noise / A.E.Jr. Bryson, D.E. Johansen // IEEE Trans. Automat. Contr. – N1. – P.4-10.

277. Busy, R.S. Optimal filtering for correlated noise / R.S.Busy // J.Math. Anal. and Appl. – 1967. – P.1-8.

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

279. Dasarathy, B. Timing constrants of real-time systems / B. Dasarathy // Real-time systems symp. – N.-Y.: IEEE, 1982. – P. 197-204.

280. Kalman, R.E. A new approach to linear filtering and preediction problems / R.E.Kalman // Trans. ASME Journal Basic Engeneering. – 1960. – P.35-45.

281. Kalman, R.E. New results in linear filtering and prediction theory / R.E.Kalman, R.C.Busy // Trans. ASME, Journal Of Basic Engineering. - 1961. – V. 83, № 1. – P. 35-78.

282. Miyamoto, Y. Optimal filter for coloured measurement noise / Y. Miyamoto, H.Takeda // Technol. Repts Tohoku Univ. – 1976. – № 1. – P. 83-104.

283. Moylan, P.J. A. note on kalman-Bucy filters with zero measurements noise / P.J.Moylan // IEEE trans. Automat. Contr. – 1974. – P. 263-264.

284. O`Reilly, J. Minimal-order observer-estimator for continuous time linear systems / J.O`Reilly, M.Newmann // Int. J. Contr. – 1975. – P. 573-590.

285. Sarachik, P.E. State estimation from measurements with correlated noise without using differenriators / P.E.Sarachik // Int. J. Contr. – 1971. – P. 53-63.

286. Stear, E.B. Optimal filtering for Gauss-Markov noise / E.B.Stear, A.R.Stubberud // Int. J. Contr. – 1968. – P. 123-130.

287. Tomita, Y. An application of information theory to filtering problems / Y.Tomita, S.Omatu // Information Sciences. – 1976. – № 11. – P. 13-27.

288. Wiener, N. Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series / N.Wiener. – New York: Wiley, 1949.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Доказательства лемм о полном анализе энергосберегающего управления объектом первого порядка

Доказательство леммы 4.1: Определим виды функций энергосберегающего управления с помощью принципа максимума [96].

Гамильтониан в данном случае (4.1) записывается в виде

$$H(z,u,\psi) = -u^2 + \psi(a\,z(t) + b\,u(t)). \qquad (\text{ПА.1})$$

Функции - импульсы $\psi(t)$ являются решением уравнений

$$\frac{d}{dt}\,\psi(t) = -\frac{d}{dz}H(z,u,\psi),\ \frac{d\psi}{dt} = -a\psi\ . \qquad (\text{ПА.2})$$

Решение уравнений (ПА.2) имеет вид:

$$\psi(t) = c\,e^{-at}, \qquad (\text{ПА.3})$$

где с - постоянная интегрирования.

Продифференцируем (ПА.1) по u и приравняем производную нулю:

$$\frac{dH(z,u,\psi)}{du} = -2\,u + b\,\psi_1 = 0. \qquad (\text{ПА.4})$$

Решение уравнения (ПА.4) дает соотношение для определения множества видов управления. В результате получаем множества видов управления

$$u^*(t) = \begin{cases} u_H, & \text{если } -\frac{1}{2}b\,\psi(t) \le u_H, \\ -\frac{1}{2}b\,\psi(t), & \text{если } -\frac{1}{2}b\,\psi(t) \in [u_H, u_B], \\ u_B, & \text{если } -\frac{1}{2}b\,\psi(t) \ge u_B. \end{cases} \qquad (\text{ПА.5})$$

Таким образом, $u^*(t)$ может принадлежать к одному из следующих классов

$$u^*(t) \in ((const) \vee \mu_c(exp) \vee \mu_н(exp, u_{гр}) \vee \mu_н(u_{гр}, exp)). \qquad (\text{ПА.6})$$

Доказательство леммы 4.3: В дифференциальном уравнении (4.1), сделаем замену переменной:

$$t = \frac{t_k - t_0}{2} T + t_0 \qquad \text{(ПА.7)}$$

и замену функции

$$u = \frac{u_в - u_н}{2}[U + \Delta], \qquad \text{(П.А.8)}$$

где $\Delta = \frac{u_в + u_н}{u_в - u_н}$.

Получаем уравнение

$$\dot{Z} = AZ(T/h) + BU(T/h) + B_0. \qquad \text{(П.А.9)}$$

Решение уравнения (ПА.9) имеет вид:

$$(z_k - z_0 e^{2A}) / B - B_0 (e^{2A} - 1) / AB = \int_0^2 e^{A(2-T)} U(T) dT. \quad \text{(П.А.10)}$$

Обозначим левую часть (ПА.10) через L – условие существования задачи (4.15). Тогда

$$\int_0^2 e^{A(2-T)} U(T) dT = L. \qquad \text{(П.А.11)}$$

Возьмем в (П.А.11) $U(T) = -1,$ тем самым находим $L_{\min}(A) = -\frac{(e^{2A} - 1)}{A}$.

Теперь возьмем в (П.А.11) $U(t) = 1,$ и найдем $L_{\max}(A) = \frac{(e^{2A} - 1)}{A}$.Так как $-1 \le U \le 1,$ то $L_{\min}(A) \le L \le L_{\max}(A).$ Условие (4.7) доказано.

Теперь в функционале (1.1), который требуется минимизировать для нахождения функций управления, сделаем замену переменной (П.А.7) и замену функции (П.А.8). Получим

$$J_э = \int_0^2 U^2(T_h) dT \to \min_U. \qquad \text{(П.А.12)}$$

Таким образом, функции реальной задачи $u^*(t)$, минимизирующие функционал (1.1) совпадают с функциями нормированной задачи $U^*(T)$, минимизирующих

функционал (П.А.12) в соответствии с указанными заменами переменной и функции.

Доказательство лемм 4.4 и 4.5. Из лемм 4.1 и 4.3 получим функции управления для реальной и нормированной задач. Подставим их в решение задачи Коши (2.8)–(2.11) для реальной задачи и в (4.5) – для нормированной. Получим траектории изменения фазовых координат (4.11)–(4.12) и (4.13)–(4.14).

Приложение Б

Экспериментальные данные и результаты
анализа и синтеза управляющих воздействий режима «Пуск»
сушильной установки вальцеленточного типа

Таблица П Б.1 – Термограммы нагрева камер пятикамерной СВЛ
при традиционном управлении

№ п.п.	Время *t*, мин	Температура в камерах, °С				
		z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	0	20	20	20	20	20
2	0,33	20,3	20,4	20,3	20,8	20,7
3	0,66	20,7	21,1	21	21,6	21,6
4	1	21,6	22,2	21,9	23	23
5	1,33	22,7	23,4	23	24,1	24,3
6	1,66	24,2	25	24,1	25,8	25,9
7	2	25,7	26,6	25,3	27,4	27,5
8	2,33	27,3	28,3	26,6	28,9	29,1
9	2,66	29	30,1	27,9	30,5	30,6
10	3	31	31,9	29,4	32,1	32,2
11	3,33	32,5	33,6	30,7	33,6	33,7
12	3,66	34,7	35,5	32,2	35,1	35,2
13	4	36,2	37,1	33,4	36,6	36,6
14	4,33	37,9	38,7	34,8	38	38
15	4,66	39,5	40,2	36,1	39,2	39,3
16	5	40,8	41,7	37,3	40,5	40,5
17	5,33	42,5	43,2	38,7	41,8	41,7
18	5,66	43,9	44,5	40	42,9	42,9
19	6	45,2	45,8	41,1	44	44
20	6,33	46,6	47,1	42,2	45,1	45,1
21	6,66	47,8	48,2	43,2	46,1	46,1
22	7	48,9	49,3	44,1	47,1	47,1
23	7,33	49,9	50,3	45	48,1	48

Продолжение таблицы П Б.1

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
24	7,66	50,9	51,2	46	49,1	49
25	8	51,8	52,1	46,9	49,9	49,8
26	8,33	52,8	53	47,7	50,9	50,7
27	8,66	53,5	53,7	48,6	51,6	51,5
28	9	54,4	54,5	49,4	52,3	52,2
29	9,33	55,1	55,2	50,1	53	52,9
30	9,66	55,7	55,8	50,8	53,8	53,7
31	10	56,3	56,4	51,5	54,1	54,4
32	10,33	57,1	57,1	52,1	55,1	55
33	10,66	57,8	57,7	52,7	55,9	55,7
34	11	58,1	58,1	53,3	56,3	56,2
35	11,33	58,7	58,6	53,9	56,9	56,8
36	11,66	59,2	59,1	54,4	57,4	57,3
37	12	59,7	59,6	54,9	58	57,9
38	12,33	60,2	60,1	55,4	58,5	58,3
39	12,66	60,8	60,5	56	59	58,9
40	13	61,2	60,8	56,4	59,5	59,4
41	13,33	61,5	61,2	56,8	60	59,9
42	13,66	61,9	61,6	57,3	60,5	60,4
43	14	62,4	61,9	57,7	60,8	60,7
44	14,33	63,2	62,4	58,2	61,2	61,2
45	14,66	63,6	62,5	58,5	61,2	61,7
46	15	63,9	62,9	58,8	61,8	62
47	15,33	64,2	63,2	59,3	62,3	62,4
48	15,66	64,5	63,4	59,7	62,5	62,8
49	16	64,7	63,7	60	62,9	63,1
50	16,33	65	64	60,4	63,4	63,5
51	16,66	65,2	64,1	60,7	63,5	63,9
52	17	65,4	64,4	61	63,9	64,2
53	17,33	65,6	64,6	61,3	64,2	64,6
54	17,66	65,7	64,7	61,5	64,5	64,9
55	18	66	64,9	61,9	64,6	65,2

Продолжение таблицы П Б.1

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
56	18,33	66,1	65,2	62,1	65,2	65,4
57	18,66	66,4	65,3	62,5	65,2	65,7
58	19	66,4	65,5	62,6	65,7	66
59	19,33	66,7	65,6	63	65,7	66,3
60	19,66	66,8	65,8	63,1	66	66,6
61	20	67	66	63,4	66,4	66,9
62	20,33	67,1	66,1	63,7	66,7	67,1
63	20,66	67,3	66,2	64	66,7	67,4
64	21	67,4	66,4	64,1	67	67,5
65	21,33	67,6	66,5	64,3	67,1	67,8
66	21,66	67,7	66,7	64,5	67,4	68
67	22	67,9	66,8	64,7	67,4	68,2
68	22,33	68	67	64,8	67,7	68,5
69	22,66	68,2	67,1	65	67,8	68,8
70	23	68,5	67,4	65,3	68,1	68,9
71	23,33	68,6	67,5	65,4	68,2	69,1
72	23,66	68,7	67,7	65,6	68,6	69,3
73	24	68,8	67,7	65,8	68,5	69,5
74	24,33	69	67,9	65,9	68,7	69,8
75	24,66	69,1	68,1	66,1	69,1	69,9
76	25	69,3	68,2	66,4	69,1	70,1
77	25,33	69,4	68,4	66,5	69,4	70,3
78	25,66	69,5	68,5	66,7	69,6	70,6
79	26	69,8	68,6	66,9	69,5	70,8
80	26,33	69,8	68,8	66,9	69,8	70,9
81	26,66	69,9	68,9	67,1	70	71,1
82	27	70	69	67,3	70,2	71,3
83	27,33	70,2	69,1	67,5	70,3	71,5
84	27,66	70,2	69,1	67,5	70,3	71,7
85	28	70,3	69,3	67,7	70,7	71,9
86	28,33	70,4	69,3	67,9	70,7	72
87	28,66	70,4	69,4	68	70,9	72,2

Продолжение таблицы П Б.1

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
88	29	70,6	69,5	68,2	71	72,3
89	29,33	70,7	69,7	68,4	71,3	72,6
90	29,66	70,8	69,7	68,5	71,3	72,7
91	30	71	69,8	68,6	71,4	72,9
92	30,33	71,1	70	68,8	71,6	73,1
93	30,66	71,1	70,1	68,9	71,8	73,3
94	31	71,1	70,1	69	71,9	73,4
95	31,33	71,2	70,1	69,1	71,8	73,6
96	31,66	71,3	70,3	69,2	72,1	73,7
97	32	71,5	70,4	69,4	72,2	73,8
98	32,33	71,6	70,5	69,5	72,2	74
99	32,66	71,7	70,7	69,6	72,5	74,1
100	33	71,8	70,7	69,7	72,5	74,3
101	33,33	71,8	70,8	69,8	72,7	74,3
102	33,66	71,9	70,8	69,9	72,7	74,5
103	34	71,9	70,9	70	72,9	74,6
104	34,33	72	70,9	70,1	72,9	74,6
105	34,66	72	71	70,2	73,1	74,7
106	35	72	71	70,3	73,2	74,9
107	35,33	72,1	71	70,4	73,2	74,9
108	35,66	72,1	71,1	70,5	73,5	75,1
109	36	72,2	71	70,6	73,2	75,1
110	36,33	72,2	71,2	70,6	73,5	75,3
111	36,66	72,2	71,2	70,7	73,7	75,3
112	37	72,1	71,1	70,8	73,7	75,5
113	37,33	72,1	71,1	70,9	73,8	75,6
114	37,66	72,2	71,1	71	73,8	75,6
115	38	72,2	71,1	71	73,7	75,7
116	38,33	72,2	71,2	71	74	75,7
117	38,66	72,2	71,1	71,1	73,9	75,9
118	39	72,3	71,1	71,1	73,9	76

Таблица П Б.2 – Термограммы нагрева пятикамерной СВЛ с ресурсосберегающим управлением

№ п.п.	Время *t*, мин	Температура в камерах, °С				
		z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
2	0,33	20,1	20,1	20,1	20,1	20,2
3	0,66	20,3	20,5	20,2	20,4	20,5
4	1	20,5	20,9	20,5	20,9	21,0
5	1,33	20,9	21,4	20,8	21,3	21,5
6	1,66	21,3	22,0	21,2	21,8	22,0
7	2	21,8	22,5	21,5	22,4	22,5
8	2,33	22,2	23,1	21,9	22,9	23,1
9	2,66	22,7	23,6	22,5	23,4	23,6
10	3	23,2	24,2	23,2	23,9	24,1
11	3,33	23,8	24,7	24,1	24,4	24,5
12	3,66	24,3	25,2	25,2	24,9	25,0
13	4	24,8	25,7	26,3	25,3	25,5
14	4,33	25,3	26,2	27,4	25,8	25,9
15	4,66	25,9	26,6	28,6	26,2	26,3
16	5	26,7	27,1	29,8	26,6	26,7
17	5,33	27,7	27,5	30,9	27,0	27,1
18	5,66	28,9	27,9	32,1	27,4	27,5
19	6	30,1	28,5	33,2	28,0	28,1
20	6,33	31,4	29,4	34,4	28,9	29,0
21	6,66	32,7	30,6	35,4	29,9	30,2
22	7	34,1	31,8	36,5	31,1	31,4
23	7,33	35,4	33,0	37,5	32,3	32,6
24	7,66	36,7	34,3	38,5	33,6	33,8
25	8	38,1	35,6	39,5	34,8	35,0
26	8,33	39,3	36,8	40,4	36,0	36,1
27	8,66	40,6	38,0	41,2	37,1	37,2
28	9	41,8	39,2	42,1	38,2	38,3

Продолжение таблицы П Б.2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
29	9,33	42,9	40,3	42,9	39,3	39,4
30	9,66	44,0	41,4	43,7	40,4	40,4
31	10	45,1	42,5	44,4	41,4	41,4
32	10,33	46,1	43,5	45,1	42,4	42,3
33	10,66	47,0	44,4	45,8	43,3	43,2
34	11	47,9	45,4	46,4	44,2	44,1
35	11,33	48,8	46,3	47,0	45,0	44,9
36	11,66	49,6	47,1	47,6	45,9	45,7
37	12	50,3	47,9	48,2	46,6	46,5
38	12,33	51,1	48,7	48,7	47,4	47,3
39	12,66	51,8	49,5	49,3	48,1	48,0
40	13	52,6	50,2	49,8	48,8	48,7
41	13,33	53,3	50,9	50,2	49,5	49,4
42	13,66	54,1	51,6	50,7	50,1	50,0
43	14	54,8	52,2	51,2	50,8	50,7
44	14,33	55,5	52,9	51,8	51,4	51,3
45	14,66	56,2	53,5	52,3	52,1	51,8
46	15	56,8	54,1	52,9	52,8	52,5
47	15,33	57,5	54,8	53,4	53,6	53,2
48	15,66	58,1	55,5	54,0	54,3	53,9
49	16	58,6	56,2	54,5	55,0	54,6
50	16,33	59,2	56,9	55,0	55,7	55,3
51	16,66	59,7	57,6	55,5	56,4	56,0
52	17	60,2	58,3	56,0	57,0	56,7
53	17,33	60,7	59,0	56,5	57,7	57,3
54	17,66	61,1	59,6	57,0	58,3	58,0
55	18	61,6	60,2	57,5	58,8	58,6
56	18,33	62,0	60,7	57,9	59,3	59,1
57	18,66	62,5	61,1	58,4	59,8	59,7
58	19	62,9	61,5	58,8	60,3	60,2
59	19,33	63,3	61,8	59,2	60,7	60,7
60	19,66	63,7	62,2	59,6	61,2	61,2

Продолжение таблицы П Б.2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
61	20	64,1	62,5	60,0	61,6	61,6
62	20,33	64,4	62,8	60,4	62,0	62,1
63	20,66	64,8	63,1	60,8	62,4	62,6
64	21	65,1	63,4	61,1	62,8	63,0
65	21,33	65,4	63,6	61,5	63,2	63,4
66	21,66	65,7	63,9	61,8	63,5	63,8
67	22	66,0	64,2	62,1	63,9	64,2
68	22,33	66,3	64,4	62,5	64,2	64,6
69	22,66	66,6	64,7	62,8	64,6	65,0
70	23	66,9	64,9	63,1	64,9	65,4
71	23,33	67,1	65,1	63,4	65,2	65,8
72	23,66	67,4	65,4	63,7	65,6	66,1
73	24	67,6	65,6	64,0	65,9	66,5
74	24,33	67,9	65,8	64,2	66,2	66,8
75	24,66	68,1	66,0	64,5	66,4	67,1
76	25	68,3	66,2	64,7	66,7	67,5
77	25,33	68,5	66,4	65,0	67,0	67,8
78	25,66	68,7	66,6	65,2	67,3	68,1
79	26	68,9	66,8	65,5	67,5	68,4
80	26,33	69,1	67,0	65,7	67,8	68,7
81	26,66	69,3	67,1	65,9	68,0	69,0
82	27	69,4	67,3	66,1	68,3	69,3
83	27,33	69,6	67,5	66,4	68,5	69,5
84	27,66	69,8	67,6	66,6	68,7	69,8
85	28	69,9	67,8	66,8	69,0	70,1
86	28,33	70,1	68,0	67,0	69,2	70,3
87	28,66	70,2	68,1	67,1	69,4	70,6
88	29	70,3	68,3	67,3	69,6	70,8
89	29,33	70,5	68,4	67,5	69,8	71,0
90	29,66	70,6	68,5	67,7	70,0	71,3
91	30	70,7	68,7	67,8	70,2	71,5
92	30,33	70,8	68,8	68,0	70,4	71,7

Продолжение таблицы П Б.2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
93	30,66	71,0	68,9	68,2	70,5	71,9
94	31	71,1	69,1	68,3	70,7	72,1
95	31,33	71,1	69,2	68,5	70,9	72,3
96	31,66	71,1	69,3	68,6	71,0	72,5
97	32	71,2	69,4	68,8	71,2	72,7
98	32,33	71,3	69,5	68,9	71,4	72,9
99	32,66	71,5	69,6	69,0	71,4	73,1
100	33	71,6	69,7	69,1	71,6	73,3
101	33,33	71,7	69,8	69,2	71,8	73,4
102	33,66	71,8	70,0	69,4	71,9	73,6
103	34	71,8	70,1	69,5	71,8	73,7
104	34,33	71,9	70,1	69,6	72,1	73,8
105	34,66	71,9	70,1	69,7	72,2	74,0
106	35	72,0	70,3	69,8	72,2	74,1
107	35,33	72,0	70,4	69,9	72,5	74,3
108	35,66	72,0	70,5	70,0	72,5	74,3
109	36	72,1	70,7	70,1	72,7	74,5
110	36,33	72,1	70,7	70,2	72,7	74,6
111	36,66	72,2	70,8	70,3	72,9	74,6
112	37	72,2	70,8	70,4	72,9	74,7
113	37,33	72,2	70,9	70,5	73,1	74,9
114	37,66	72,1	70,9	70,6	73,2	74,9
115	38	72,1	71,0	70,6	73,2	75,1
116	38,33	72,2	71,0	70,7	73,5	75,1
117	38,66	72,2	71,0	70,8	73,2	75,3
118	39	72,2	71,0	70,9	73,5	75,3
119	39,33	72,2	71,1	71,0	73,7	75,5
120	39,66	72,3	71,1	71,0	73,7	75,6
121	40	—	71,1	71,0	73,8	75,6
122	40,33	—	71,1	71,1	73,8	75,7
123	40,66	—	71,1	71,1	73,7	75,7
124	41	—	71,1	—	74,0	75,9
125	41,33	—	71,1	—	73,9	76

Продолжение таблицы П Б.2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
126	41,66	—	71,1	—	73,9	—
127	42	—	71,2	—	—	—

Приложение В

Экспериментальные статистические данные, использованные при обучении нейронных сетей

Таблица П В.1 – Экспериментальные данные (центр второй камеры).

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	y_1
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
75	25	72	3.7	101.2	84.2	95.4	1	95	95	38.5
72	22	68	3.7	98.5	82	91.3	1	100	95	38.2
70	22	67	3.5	101.7	80	94.3	1	100	100	38.8
74	25	72	3.6	95.9	83.4	91.9	1	95	95	39.2
72	25	71	3.6	96.3	86.1	98.6	1	95	90	38.9
77	23	69	3.4	102.6	82.8	94.1	1	95	95	38.6
71	23	66	3.6	100	81.8	92.5	1	95	90	39.4
75	24	75	3.6	96.6	82.5	95.4	1	100	95	39.1
76	24	67	3.4	94.3	85.6	96.6	1	95	95	39.2
73	23	69	3.6	91.8	83.5	96.2	1	100	90	39.3
72	24	67	3.4	79.7	66.8	96.1	0	90	90	48
75	23	67	3.5	100.6	85.5	95.1	1	100	95	39.7
71	25	72	3.5	97.4	81.4	94.4	1	95	95	40.1
78	23	70	3.6	95.4	79.8	94.5	1	100	100	39.5
72	25	74	3.4	101.3	82.8	92.6	1	95	95	40.8
76	23	68	3.5	92.5	85.5	91.3	1	95	95	39.6
77	24	66	3.7	101.7	86.3	92	0	95	90	42.1
71	23	67	3.7	94.6	80.5	99.2	0	100	95	42.2
72	23	75	3.4	100.7	78.9	93	0	95	100	43.1
74	24	67	3.7	99.6	82.8	101.4	0	95	95	41.9
77	24	75	3.6	102.1	84	96.2	0	100	90	42.3
77	24	67	3.6	94.7	83.7	94.6	1	100	100	38.3
79	24	75	3.6	96.8	82.2	97	0	100	95	43.4
80	24	66	3.5	94.5	85.3	92.7	1	95	100	38.9
78	23	73	3.6	101.1	82.6	96.2	0	95	90	42.9
75	23	70	3.5	99	82.9	97.8	0	100	95	43.2
78	22	66	3.6	102.7	80.4	96.7	0	95	95	43.3
72	23	69	3.5	94.9	81.6	93.9	0	95	95	43
75	23	73	3.6	99.6	80.3	98.6	0	95	95	43.1
72	24	67	3.4	92.8	84.8	97.6	0	95	90	44.1
78	23	74	3.5	94	84.4	99.4	0	90	90	43.8
73	24	65	3.4	102.3	82.8	96.1	0	100	90	43.6
75	24	66	3.4	87.1	82.3	94.7	0	100	95	45
76	25	65	3.4	92.3	83.2	98.2	0	95	90	45.2
75	24	65	3.4	79.6	82.3	93.8	0	95	90	46.2
77	22	66	3.6	82.2	79.4	96.5	0	90	90	45.9
77	24	66	3.6	78	74.7	93.1	0	90	90	46

Продолжение таблицы П В.1

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
78	26	72	3.5	83.5	83.9	94.9	0	95	95	47
72	25	63	3.7	71.3	53	74	0	100	95	48.9
77	25	65	3.6	77.5	46.3	73.8	0	100	90	50.1
74	24	60	3.7	73.3	47.7	70.7	0	100	95	49.8
76	23	62	3.7	72.6	47.9	73.5	0	90	95	51.5
78	24	65	3.6	76.8	45.5	70.6	0	90	90	50.6
72	24	65	3.6	80	48	73.3	0	95	95	50
75	24	60	3.6	75.2	46.8	71.2	0	100	90	50.4
75	25	61	3.5	77.1	49.9	74	0	95	90	49.9
75	23	62	3.6	75.7	44.9	68.4	0	90	100	51.5
75	24	61	3.4	77	50.4	72.9	0	90	100	51.6
71	24	61	3.6	77.7	50.4	70.1	0	90	85	51.3
76	24	65	3.5	75.3	41.3	72.2	0	90	100	51.9
71	23	65	3.5	73.7	47.7	73.9	0	100	90	52.6
73	22	63	3.6	76	45.3	68.4	0	90	100	52.9
73	23	72	3.8	77.8	42.1	70.1	0	95	90	51.8
76	25	61	3.6	76.2	43.9	70	0	95	90	52.1
76	24	72	3.6	78.4	45	68.9	0	95	95	52.2
73	24	72	3.3	77.4	48.6	71.5	0	90	90	52.3
80	24	73	3.5	75.2	42	70.1	0	90	90	52.8
79	25	66	3.5	77.4	45.9	73.6	0	90	95	51.7
77	23	65	3.6	76.2	41.8	72.4	0	95	95	52.4
71	24	62	3.3	77.1	42.2	69.8	0	95	95	53.1
70	24	75	3.7	78.7	45	68.3	0	90	85	52.7
77	22	68	3.6	75.7	46.5	69.3	0	90	100	52.5
78	22	72	3.3	76.4	43.9	71.5	0	95	100	54.5
75	22	67	3.3	78.1	50.4	71.3	0	100	90	53.7
72	25	73	3.5	79.8	46.1	74.6	0	95	85	54
72	23	74	3.4	77.9	41.7	71.8	0	90	90	54.5
80	24	65	3.5	76.5	44	72.9	0	90	100	53.2
72	25	68	3.5	75.8	46.1	72.5	0	90	95	52.5
71	22	62	3.5	73.8	42.3	75.8	0	95	95	53.8
71	23	63	3.5	75.3	42.6	75.7	0	90	90	54.1
73	23	64	3.5	72.9	41.4	75.6	0	90	95	53.6
75	22	63	3.4	76.5	45.8	68.1	0	95	90	55.2
72	24	63	3.4	73.3	45.9	93	0	5	35	55.8
77	23	71	3.4	77	41.4	95.4	0	0	30	57
74	24	67	3.2	69.8	42.4	95	0	0	35	57.4
76	26	66	3.2	73.9	46	93.6	0	0	35	57.6
76	24	64	3.2	76.9	46.5	93	0	0	30	57.5
70	25	65	3.2	70.3	45.9	96.2	0	0	35	58
73	23	67	3.3	65.5	44.3	95.6	0	5	35	58.2
75	24	65	3.2	66.7	45.8	94.4	0	5	25	57.8

Продолжение таблицы П В.1

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
71	25	69	3.2	72.6	40.6	99.9	0	0	25	58.4
72	25	69	3.3	69.4	38.8	101.8	0	0	25	59
74	25	71	3.1	64	40.2	96.7	0	5	30	59.5
76	24	69	3	68.2	40.4	98.8	0	5	30	60.7
74	24	65	3.1	62.5	40.7	101.7	0	5	30	60.6
71	23	70	3.3	67.5	40.5	95.5	0	0	35	59.4
72	23	68	3.3	67.3	40.2	97.6	0	0	35	59.7
73	23	67	3.1	71.9	38.7	97.4	0	5	30	60
78	22	73	3.3	69	40.4	98.3	0	5	25	60.5
69	23	64	3.1	63.6	39.9	97.9	0	0	30	61.3

Таблица П В.2 – Экспериментальные данные (выход второй камеры)

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	y_1
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
75	25	72	3.64	99.7	82.7	97.3	1	95	95	22.5
72	22	69	3.71	100.3	83.6	92.5	1	100	95	22.2
71	22	68	3.57	101.5	80.5	94.8	1	100	100	22.8
74	25	72	3.64	96.7	81.8	90.8	1	95	95	23.2
71	25	70	3.71	95.5	85	96.8	1	95	90	22.9
77	23	68	3.46	101.5	84.2	95.2	1	95	95	22.6
72	23	66	3.57	100.5	80.2	94.2	1	95	90	23.4
76	24	74	3.61	97.5	81.6	94.7	1	100	95	23.1
75	24	68	3.43	93.3	85.2	97.9	1	95	95	23.2
73	23	68	3.61	93	82	95.5	1	100	90	23.3
72	24	66	3.43	80.7	65.8	97.6	0	90	90	32
76	23	66	3.39	98.9	84.1	94.9	1	100	95	23.7
71	25	72	3.54	99.2	80.4	93.8	1	95	95	24.1
77	23	71	3.5	95.9	80.8	95.6	1	100	100	23.5
72	25	75	3.39	100.5	83.6	91.1	1	95	95	24.8
77	23	68	3.46	93.4	86.2	90.2	1	95	95	23.6
76	24	65	3.61	101.2	85.5	90.3	0	95	90	26.1
71	23	67	3.64	94.8	81.4	97.8	0	100	95	26.2
73	23	74	3.43	101.4	80.2	91.3	0	95	100	27.1
75	24	67	3.64	98.1	81.8	99.8	0	95	95	25.9
77	24	75	3.61	100.5	84.4	97.8	0	100	90	26.3
76	24	67	3.57	95.6	82.8	93.8	1	100	100	22.3
78	24	74	3.5	98.6	82.1	95.4	0	100	95	27.4
79	24	66	3.43	94.6	86.1	91.5	1	95	100	22.9
78	23	73	3.57	101.3	83.7	97.9	0	95	90	26.9
77	23	70	3.46	98.7	82.6	96.1	0	100	95	27.2
78	22	67	3.54	101.4	81.8	97.6	0	95	95	27.3
71	23	69	3.54	95.5	82.6	93	0	95	95	27

Продолжение таблицы П В.2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
75	23	73	3.57	99.2	80	98.6	0	95	95	27.1
73	24	67	3.39	93.8	84	97.3	0	95	90	28.1
78	23	73	3.57	95.5	83.7	97.9	0	90	90	27.8
74	24	66	3.39	101.6	83.9	97.3	0	100	90	27.6
74	24	67	3.36	88.3	83.3	93.4	0	100	95	29
75	25	65	3.39	90.6	82.5	96.5	0	95	90	29.2
75	24	66	3.43	78.4	81.3	95.6	0	95	90	30.2
76	22	67	3.62	83.2	78.8	95.3	0	90	90	29.9
77	24	66	3.62	77	75.3	91.3	0	90	90	30
77	26	73	3.41	82.1	84.8	95.4	0	95	95	31
73	25	62	3.66	72.7	52.6	73.4	0	100	95	32.9
76	25	64	3.62	78.3	47.2	72.6	0	100	90	34.1
75	24	61	3.72	74.5	46.9	70.7	0	100	95	33.8
76	23	61	3.69	73.6	48.3	72.6	0	90	95	35.5
75	25	72	3.64	99.7	82.7	97.3	1	95	95	22.5
77	24	66	3.66	77	45.9	71.3	0	90	90	34.6
71	24	65	3.62	78.6	48.8	74.3	0	95	95	34
75	24	61	3.66	74.5	47	70.7	0	100	90	34.4
76	25	62	3.55	78.1	50	73.8	0	95	90	33.9
74	23	63	3.62	75	44.2	69.6	0	90	100	35.5
74	24	62	3.41	77.9	49.9	72.6	0	90	100	35.6
71	24	61	3.55	77.7	49.7	71.1	0	90	85	35.3
75	24	66	3.52	76.7	41.2	71.2	0	90	100	35.9
70	23	66	3.48	73.2	47.2	74.9	0	100	90	36.6
72	22	63	3.62	75.7	44.5	69.8	0	90	100	36.9
73	23	71	3.72	76.4	42.9	69.3	0	95	90	35.8
76	25	61	3.62	74.8	43.6	70	0	95	90	36.1
76	24	73	3.59	78.2	44.6	69.1	0	95	95	36.2
72	24	71	3.38	76.7	48.8	72.3	0	90	90	36.3
79	24	72	3.52	75.8	42.2	71.1	0	90	90	36.8
79	25	65	3.59	76.8	45.3	74.5	0	90	95	35.7
77	23	64	3.66	75.9	42.1	71.8	0	95	95	36.4
70	24	63	3.38	76.3	41.5	70.5	0	95	95	37.1
71	24	75	3.69	77.2	45.4	69.1	0	90	85	36.7
76	22	69	3.55	76.9	46.8	70.5	0	90	100	36.5
79	22	72	3.38	75	43.7	70.3	0	95	100	38.5
75	22	67	3.41	78.9	49.6	71.1	0	100	90	37.7
72	25	74	3.45	78.3	45.5	74.7	0	95	85	38
73	23	74	3.41	77	41.9	71.4	0	90	90	38.5
79	24	66	3.48	75.8	44.1	74.2	0	90	100	37.2
73	25	68	3.52	74.4	46.3	71.6	0	90	95	36.5
70	22	63	3.59	73.7	42.1	74.9	0	95	95	37.8
72	23	63	3.45	75.4	42.8	74.4	0	90	90	38.1

Продолжение таблицы П В.2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
72	23	64	3.52	73.9	41.5	75.4	0	90	95	37.6
76	22	63	3.38	77.4	45.6	69.2	0	95	90	39.2
71	24	64	3.31	73.6	46.7	93.6	0	5	35	39.8
77	23	70	3.38	76.4	42.2	96.8	0	0	30	41
73	24	66	3.24	70.9	42.6	95.3	0	0	35	41.4
75	26	66	3.17	72.9	46.5	94.6	0	0	35	41.6
76	24	65	3.14	75.5	46.5	94.5	0	0	30	41.5
70	25	65	3.14	69.3	45.6	97.3	0	0	35	42
73	23	67	3.24	66.4	45.2	95.7	0	5	35	42.2
74	24	65	3.24	66.4	46.5	93.6	0	5	25	41.8
72	25	68	3.24	71.5	40.2	98.6	0	0	25	42.4
73	25	69	3.21	70.7	39.3	99.8	0	0	25	43
74	25	70	3.14	65.23	40.2	95.5	0	5	30	43.5
75	24	69	2.97	67.7	40.3	99.6	0	5	30	44.7
74	24	64	3.03	63.7	40.6	99.9	0	5	30	44.6
70	23	69	3.21	67.6	41	96.8	0	0	35	43.4
73	23	69	3.24	66.5	39.6	98.3	0	0	35	43.7
74	23	68	3.1	71	39.1	96.1	0	5	30	44
78	22	72	3.24	68.7	40.5	97.7	0	5	25	44.5

Здесь x_1 – начальная влажность материала, x_2 – температура воздуха в цехе (^oC), x_3 – влажность воздуха в цехе, x_4 – скорость движения продуктового транспортера (10^4 м/сек), x_5 – средняя температура сушильного агента(^oC), x_6- средняя влажность сушильного агента (%),x_7 – работа вытяжного вентилятора (%),x_8 – наличие/отсутствие ворошителя, x_9– открытие воздухозаборного окна (%), x_{10} – открытие шибера (%), y_1 – влажность материала в камере (%).

Таблица П В.3 – Экспериментальные данные (центр третьей камеры)

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
22	25	62	2.76	97.8	54.6	96.7	95	100	14.1
21.4	24	60	2.85	97	63.6	94.4	95	100	14.6
21	24	63	2.7	96.9	71.8	94.2	95	100	14.7
25.9	25	74	2.71	97.8	70.1	97.5	100	95	14.8
22.6	22	61	2.69	102.2	66.6	100.2	95	100	14.9
26.2	25	63	2.7	98.8	68.3	96.8	90	100	15
24.2	22	68	2.7	99.3	67	98.2	100	100	15.1
27.2	25	72	2.67	96.6	68.1	98.3	95	100	15.2
27.2	24	67	2.7	100.6	68.6	96.5	95	95	15.3
26.9	23	72	2.73	98.1	68.5	99.6	100	95	15.4
25.1	23	64	2.66	97.3	67.4	97.1	95	95	15.5
27.6	24	70	2.76	99.2	72.1	96.2	95	100	15.6
23.3	24	64	3.38	94.7	75.3	97.4	95	95	15.7
23.3	22	61	2.86	97.3	69.4	97	95	95	15.8
22.1	23	71	3.29	95.8	70.8	97.2	90	100	15.9
24.4	25	71	3.62	91.7	77.3	98.6	95	95	16
26.4	24	74	3.27	96	73.1	96.1	95	95	16.1
25.8	23	65	3.18	97.5	70.8	99.4	90	95	16.2
23.9	23	72	3.2	95.7	74.4	95.9	95	95	16.3
27	23	72	3.3	94.4	74.2	96	100	100	16.4
23.2	22	71	3.25	93.4	70.6	93.5	95	100	16.5
22.5	24	61	3.69	89.6	76.5	96.6	95	90	16.6
23.5	22	72	3.58	90.8	72.7	100.1	95	95	16.7
23.2	23	70	3.66	92	78.9	96.2	95	95	16.8
22.9	23	74	3.73	92.2	73.7	94.3	90	95	16.9
24.4	25	64	3.64	90.4	79.2	93	95	90	17
27.4	23	67	3.47	93.4	74.8	94.7	90	100	17.1
24.1	24	70	3.64	89.5	79	99.2	90	90	17.2
23.8	23	63	3.6	90.5	80.4	93.1	95	90	17.3
27.2	24	67	3.67	90.1	79.7	94.6	90	95	17.5
36.9	24	62	2.68	90.8	70	75.4	95	100	18.8
35.3	25	71	3.54	86.5	70.9	70.9	100	90	19.6
36.9	24	60	3.67	90.4	77.6	72	95	100	19.7
36.5	24	65	3.35	90.2	70.3	79.2	90	95	19.8
36.6	23	73	3.19	81.8	47.9	74.2	100	100	20
36.9	23	70	3.29	84.7	40.8	78.6	95	90	20.1
33.8	24	71	3.22	82.8	43.9	76.1	90	95	20.2
33.3	25	60	3.6	76.3	41.7	73.6	95	90	20.3
36.5	23	71	3.39	83	41.6	72.5	95	95	20.4
30.5	24	69	3.47	72	44.9	74.2	100	90	20.5
33.6	25	63	3.32	69.9	45.1	71.4	90	100	20.6

Продолжение таблицы П В.3

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
34.2	24	71	3.45	69.5	40.5	73.9	100	95	20.7
36.2	22	61	3.32	76	39.6	74.8	100	95	20.9
35.9	23	74	3.52	77.8	39.1	72	95	100	21
36.1	24	67	3.59	75.1	41.7	74.9	95	95	21.1
37.8	23	69	3.49	72.5	39.7	74.8	100	100	21.2
37.1	24	71	3.65	76.8	45.1	76	90	95	21.3
36	25	64	3.69	71.6	45.2	74.6	90	90	21.4
35.3	23	75	3.49	76.2	38.7	72.4	95	90	21.5
36.5	24	66	3.43	73.4	40.5	74.7	90	90	21.6
34.9	24	63	3.69	72.2	42.4	70.9	90	95	21.7
31.3	22	73	3.73	72.1	46.4	69.6	90	100	21.8
37.7	23	75	3.46	71.6	42.8	75	100	90	22.1
38.2	23	70	3.65	78.3	45.2	69.7	90	95	22.2
33.9	22	63	3.7	71.2	47.7	68	95	100	22.3
36	23	76	3.63	71.8	38.2	71.6	90	90	22.4
37.3	23	64	3.76	69.9	43.6	70.2	95	95	22.6
38.5	23	67	3.63	73.4	45.4	68.4	100	90	22.7
34.8	23	72	3.67	67.6	40.1	69.1	90	90	23.3
37.3	22	60	3.73	70.7	44.3	67	90	95	23.5
41.8	23	64	3.05	93.4	50.1	95.6	10	40	27
46.3	25	62	2.9	87.2	50.9	96	10	30	27.5
43.4	24	66	3.18	84.2	51.7	101.6	5	35	28.3
43.7	25	62	2.91	85.4	58.2	96.1	0	30	28.4
43.2	22	67	2.98	86.5	50.6	97.1	10	35	28.6
44.6	24	68	2.98	84.6	58.1	95	5	35	28.7
47.1	23	60	3.1	85.5	51.9	93	5	35	29
43.9	24	62	3.07	80.9	53.9	92.9	10	30	29.1
46.4	22	69	2.82	86.5	52.9	99.1	10	30	29.2
46.1	25	73	3.11	82.2	52.3	96.4	5	35	29.3
46.9	23	61	3.06	80.8	54.3	99	5	30	29.4
43.9	25	67	3.1	78	50.4	90.2	5	25	29.8
45.9	23	69	3.15	78.7	49.5	98.6	5	30	30
46.6	24	74	3.13	82.1	58.5	94.1	0	35	30.1
45.4	23	65	3.05	80.8	55.2	89.8	0	30	30.2
48	23	61	3.16	86.6	57.2	91.6	0	30	30.3
43.2	23	67	3.22	77.7	57.6	95.7	5	30	30.4
45.4	24	66	3.12	79.9	56.5	91.2	5	25	30.5
47.7	23	63	3.31	75.3	54.9	98.7	0	30	30.6
43	23	63	3.34	74.3	55.3	98.5	0	25	31
42.2	23	64	3.07	76	59.3	96.6	0	25	31.1
45.2	23	68	3.59	73.4	62.9	95.2	0	30	31.2
45.9	25	74	3.52	70	69.1	94.7	0	30	31.3
49.6	24	67	3.72	74.3	65.7	95	0	25	31.4

Продолжение таблицы П В.3

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
46.2	23	63	3.09	74	59.3	95	0	25	31.5
48.5	24	62	3.65	70	68.9	91.6	5	25	31.6
45.4	24	67	3.68	67.9	69.9	95.4	0	25	31.7
45.8	24	66	3.3	68.7	65.2	93.4	0	30	32
47.9	24	72	3.68	69.1	68.2	93.1	0	25	32.1
47	22	73	3.17	71.7	66	95.5	0	25	32.3

Таблица П В.4 – Экспериментальные данные (выход третьей камеры)

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
22.1	25	62	2.72	96.3	53.6	98.6	95	100	4.1
21.5	24	61	2.88	98.8	64.8	95.7	95	100	4.6
21.2	24	64	2.72	96.7	72.2	94.7	95	100	4.7
26.1	25	74	2.72	98.6	68.8	96.3	100	95	4.8
22.2	22	60	2.74	101.4	65.8	98.3	95	100	4.9
26.2	25	62	2.72	97.7	69.5	98	90	100	5
24.6	22	68	2.7	99.8	65.7	100	100	100	5.1
27.5	25	71	2.71	97.5	67.4	97.6	95	100	5.2
26.9	24	68	2.74	99.6	68.3	97.8	95	95	5.3
27	23	71	2.72	99.4	67.2	98.9	100	95	5.4
25.1	23	63	2.69	98.6	66.4	98.6	95	95	5.5
28.1	24	69	2.71	97.5	71	96	95	100	5.6
23.3	24	64	3.43	96.5	74.4	96.7	95	95	5.7
23.1	22	62	2.82	97.8	70.2	98.2	95	95	5.8
22.2	23	72	3.25	95.1	71.5	95.7	90	100	5.9
24.9	25	71	3.62	92.6	78	97.4	95	95	6
26.1	24	73	3.21	95.5	72.5	94.3	95	95	6.1
25.9	23	65	3.13	97.7	71.6	98	90	95	6.2
24.1	23	71	3.22	96.4	75.7	94.1	95	95	6.3
27.2	23	72	3.24	92.9	73.3	94.5	100	100	6.4
23.1	22	71	3.3	91.9	70.9	95	95	100	6.5
22.3	24	61	3.67	90.5	75.7	95.8	95	90	6.6
23.2	22	71	3.52	92.5	72.6	98.5	95	95	6.7
22.8	23	70	3.59	92.1	79.7	95	95	95	6.8
22.9	23	74	3.67	92.4	74.7	96	90	95	6.9
24.9	25	64	3.64	90.1	78.9	91.4	95	90	7
27.4	23	68	3.46	92.2	76.1	95.6	90	100	7.1
23.9	24	70	3.65	90.1	79.9	98.3	90	90	7.2
23.8	23	63	3.6	90.2	80.1	93.1	95	90	7.3
27.6	24	67	3.63	91.1	79	94.3	90	95	7.5
36.8	24	61	2.72	92.2	69.4	74.3	95	100	8.8
35.7	25	72	3.53	85.9	71.9	71.8	100	90	9.6
36.6	24	60	3.66	91.6	78.6	71	95	100	9.7

Продолжение таблицы П В.3

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
35.9	24	65	3.34	88.5	69.7	77.8	90	95	9.8
36.5	23	74	3.23	80.6	47.3	75.6	100	100	10
36.3	23	71	3.35	85.7	40.5	77.6	95	90	10.1
33.8	24	71	3.24	81.7	44.2	74.6	90	95	10.2
32.9	25	61	3.56	75	42.2	73.9	95	90	10.3
37.1	23	70	3.38	84.6	41.3	71.9	95	95	10.4
30	24	68	3.5	72.8	45.7	73	100	90	10.5
34.1	25	64	3.34	71	44.3	71.4	90	100	10.6
34	24	70	3.45	70.5	40.9	73	100	95	10.7
35.8	22	62	3.38	76.2	40	75.5	100	95	10.9
35.5	23	74	3.53	76.5	39.7	72.9	95	100	11
36.2	24	68	3.66	74.4	41.9	74.4	95	95	11.1
38.5	23	70	3.52	73.5	39.8	74.6	100	100	11.2
36.4	24	72	3.69	76.1	44.4	77.3	90	95	11.3
35.5	25	65	3.69	72.5	44.7	74.3	90	90	11.4
35.3	23	75	3.45	76.2	38.2	73.4	95	90	11.5
36.1	24	67	3.41	74.8	40.4	73.7	90	90	11.6
34.4	24	64	3.66	71.7	42	71.8	90	95	11.7
31	22	73	3.75	71.8	45.6	71	90	100	11.8
37.7	23	74	3.41	70.3	43.6	74.1	100	90	12.1
38	23	69	3.66	76.9	44.9	69.7	90	95	12.2
33.9	22	64	3.67	71	47.2	68.2	95	100	12.3
35.6	23	75	3.69	71.1	38.3	72.4	90	90	12.4
36.9	23	63	3.75	70.4	43.8	71.2	95	95	12.6
38.5	23	66	3.69	72.8	44.8	69.2	100	90	12.7
34.6	23	71	3.68	67.4	40.4	68.6	90	90	13.3
36.7	22	61	3.78	70	43.5	67.6	90	95	13.5
42.3	23	64	3.03	91.6	50.5	96.7	10	40	17
45.6	25	63	2.86	88.6	51.2	97.7	10	30	17.5
44	24	66	3.24	82.6	51.5	99.9	5	35	18.3
43.7	25	62	2.97	86.3	57.2	95.8	0	30	18.4
43.5	22	68	2.93	84.8	50	97.3	10	35	18.6
45.1	24	68	3	83.6	58.4	94.5	5	35	18.7
46.6	23	61	3.1	84.7	52	94.7	5	35	19
44.7	24	62	3.1	79.4	54.1	91.8	10	30	19.1
45.7	22	70	2.86	86.4	52.7	97.9	10	30	19.2
47	25	73	3.1	82.3	52.5	94.8	5	35	19.3
46.3	23	61	3.07	81.9	54.5	98.8	5	30	19.4
44.5	25	67	3.07	78.9	50.2	91.7	5	25	19.8
45	23	70	3.1	79	50.4	99.3	5	30	20
46.4	24	73	3.14	81.4	59.6	95.5	0	35	20.1
44.6	23	64	3.1	82.1	55.4	90.1	0	30	20.2
47.3	23	61	3.14	85.5	57.8	92.6	0	30	20.3

Продолжение таблицы П В.3

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
43.4	23	68	3.17	76.3	57.6	97.3	5	30	20.4
45.4	24	66	3.07	78.8	56.2	92.2	5	25	20.5
48	23	63	3.28	76.3	56	98.8	0	30	20.6
42.4	23	63	3.37	74	56.1	97.7	0	25	21
43	23	63	3.1	74.8	58.7	95.4	0	25	21.1
45.9	23	68	3.53	74.7	63.7	93.3	0	30	21.2
46.2	25	73	3.54	71.3	69	93.5	0	30	21.3
49	24	67	3.65	73.8	65.6	95.8	0	25	21.4
46	23	62	3.03	75.4	59.2	93.3	0	25	21.5
47.9	24	61	3.6	70.1	69.7	92.9	5	25	21.6
46.1	24	68	3.64	67.1	68.8	96.1	0	25	21.7
46.5	24	67	3.32	67.8	65.8	92.1	0	30	22
47.7	24	71	3.65	68.8	68.4	92.5	0	25	22.1
47.4	22	73	3.2	72.6	64.8	94.9	0	25	22.3

Здесь x_1 – влажность материала, x_2 – температура воздуха в цехе (^oC), x_3 – влажность воздуха в цехе, x_4 – скорость движения продуктового транспортера (10^4 м/сек), x_5 – средняя температура сушильного агента (^oC), x_6 – средняя влажность сушильного агента (%), x_7 – работа вытяжного вентилятора (%), x_8 – наличие/отсутствие ворошителя, x_9 – открытие воздухозаборного окна (%), x_{10} – открытие шибера (%).

Приложение Г

Параметры моделей оценки влажности $\varphi_{n=2}$

Таблица П Г.1 – Коэффициенты нормализации

№	$K^{н}_{оф}$	$K^{н}_{амп}$
1	-6.250000000000000e+00	8.999999612569809e-02
2	-4.900000095367432e+00	2.249999940395355e-01
3	-3.549999952316284e+00	5.999999865889549e-02
4	-4.750000953674316e+00	1.500000238418579e+00
5	-1.859422922134399e+00	2.735562808811665e-02
6	-7.759999036788940e-01	1.999999769032002e-02
7	-1.790540337562561e+00	2.702702395617962e-02
8	5.000000074505806e-02	8.999999761581421e-01
9	5.000000074505806e-02	8.999999612569809e-03
10	-3.357142806053162e-01	1.285714283585548e-02

Таблица П Г.2 – Коэффициенты денормализации

$K^{дн}_{оф}$	$K^{дн}_{амп}$
-1.669000029563904e+00	4.499999806284905e-02

Таблица П Г.3 – Сдвиги и углы наклона активационных функций j-го нейрона

№	$\theta^{(2)}_j$	$\beta^{(2)}_j$
1	-1,179998168889430e-01	-1.530480027198792e+00
2	3,846095156712550e-01	6.856729388237000e-01
3	3,632465590380570e-01	2.940739132463932e-02
4	-4,676198614459670e-01	1.167872548103333e+00
5	-2,149571214941860e-01	-1.664851754903793e-01
6	-1,281624805444500e-01	1.446336030960083e+00
7	-7,383953367717520e-02	-2.504343092441559e-01
8	4,912411877803890e-01	4.622435867786408e-01
9	2,050386059144870e-01	1.085963964462280e+00

Таблица П Г.4 – Сдвиг и угол наклона активационной функции нейрона выхода

$\theta_{\text{вых}}^{(2)}$	$\beta_{\text{вых}}^{(2)}$
-4,592883083590200e-01	-6.042404770851135e-00

Таблица П Г.5 – Весовые коэффициенты $w_{i,j}^{(2)}$ связей i-го входа с j-м нейроном

i / j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-0,35	-0,30	-0,25	0,74	0,93	1,37	0,02	1,39	0,60	0,68
2	-0,21	0,10	0,10	-0,34	-0,80	-0,86	-0,61	-1,03	0,05	-0,14
3	-0,33	0,32	-0,50	0,16	-0,56	-0,46	-0,41	-0,06	-0,05	-0,08
4	0,02	-0,11	-0,10	-0,56	-0,87	-1,40	-0,21	-0,55	-0,20	-0,37
5	0,45	0,38	-0,50	-0,34	-0,04	-0,30	-0,32	-0,38	-0,16	0,14
6	0,23	-0,17	0,24	-0,24	-1,58	-1,51	0,15	-0,88	-0,48	-0,41
7	0,45	0,10	0,02	0,53	0,48	-0,04	0,16	-0,08	0,01	0,26
8	0,35	-0,01	0,22	-0,01	-0,82	-1,10	-0,23	-0,64	-0,52	-0,20
9	0,26	0,21	0,38	-0,45	-1,12	-1,19	-0,42	-0,89	-0,45	-0,24

Таблица П Г.6 – Весовые коэффициенты $w_j^{(2вых)}$ связей j-го нейрона с нейроном выхода

1	2	3	4	5	6	7	8	9
-1,26	0,73	0,18	0,92	0,14	1,14	-0,20	0,66	0,83

2. Параметры моделей оценки влажности $\varphi_{\text{n=2}}^{\text{к}}$.

Таблица П Г.7 – Коэффициенты нормализации

№	$K_{\text{оф}}^{\text{н}}$	$K_{\text{амп}}^{\text{н}}$
1	-6.949999809265137e+00	1.000000014901161e-01
2	-4.900000095367432e+00	2.249999940395355e-01
3	-3.871428489685059e+00	6.428571045398712e-02
4	-4.822414398193359e+00	1.551724314689636e+00
5	-1.880960106849670e+00	2.786378003656864e-02
6	-7.740000486373901e-01	2.000000141561031e-02
7	-1.975732564926148e+00	2.931595593690872e-02
8	5.000000074505806e-02	8.999999761581421e-01
9	5.000000074505806e-02	8.999999612569809e-03
10	-3.357142806053162e-01	1.285714283585548e-02

Таблица П Г.8 – Коэффициенты денормализации

$K_{\text{оф}}^{\text{дн}}$	$K_{\text{амп}}^{\text{дн}}$
-9.590909481048584e-01	4.545454680919647e-02

Таблица П Г.9 – Сдвиги и углы наклона активационных функций j-го нейрона

Номер нейрона	$\theta_j^{(2)}$	$\beta_j^{(2)}$
1	-3,993194372386850E-01	1.705346941947937e+00
2	4,584643086031680E-01	-1.724733263254166e-01
3	-3,614154484694970E-01	9.603080749511719e-01
4	-3,358714560380870E-01	-7.699320316314697e-01
5	-1,569109164708400E-01	-4.649662375450134e-01
6	-1,443983275856810E-01	-1.172585964202881e+00
7	-1,960966826380200E-01	1.189722180366516e+00
8	-2,437360759300520E-01	-1.554224848747253e+00
9	3,165227210303050E-01	5.049869418144226e-01

Таблица П Г.10 – Сдвиг и угол наклона активационной функции нейрона выхода

$\theta_{\text{вых}}^{(2)}$	$\beta_{\text{вых}}^{(2)}$
2,502059999389630e-01	1.105731204152107e-01

Таблица П Г.11 – Весовые коэффициенты $w_{i,j}^{(2)}$ связей i-го входа с j-м нейроном

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,07	0,47	0,26	-0,81	-0,95	-1,39	-0,06	-1,39	-0,24	-0,08
2	0,18	0,14	-0,01	0,34	0,43	0,38	-0,39	0,70	0,14	0,45
3	-0,09	-0,19	0,32	-0,25	-0,59	-1,06	0,07	-1,25	-0,11	-0,16
4	0,09	0,17	0,25	-0,10	0,45	0,86	0,44	0,57	0,46	-0,26
5	0,11	0,42	-0,20	0,24	0,17	0,15	-0,30	0,80	0,51	0,37
6	-0,40	-0,22	-0,50	0,13	1,02	1,46	0,15	0,98	0,40	0,20
7	0,15	0,12	-0,12	-0,74	-0,76	-1,54	0,26	-0,79	-0,10	-0,15
8	-0,42	0,18	-0,59	0,06	1,23	1,29	0,09	1,55	-0,05	0,65
9	0,13	-0,22	-0,36	-0,27	-0,54	-0,54	0,43	-0,29	-0,08	-0,60

Таблица П Г.12 – Весовые коэффициенты $w_j^{(2вых)}$ связей j-го нейрона с нейроном выхода

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,24	-0,39	0,80	-0,33	-0,29	-0,81	0,98	-1,00	0,38

3. Параметры модели оценки влажности $\varphi_{n=3}$.

Таблица П Г.13 – Коэффициенты нормализации

№	$K_{\text{оф}}^{\text{н}}$	$K_{\text{амп}}^{\text{н}}$
1	-6.970356106758118e-01	3.557312488555908e-02
2	-6.549999713897705e+00	2.999999821186066e-01
3	-3.325000047683716e+00	5.624999850988388e-02
4	-2.126363754272461e+00	8.181818723678589e-01
5	-1.708381533622742e+00	2.601156197488308e-02
6	-7.646919488906860e-01	2.132701314985752e-02
7	-1.692774653434753e+00	2.601156197488308e-02
8	5.000000074505806e-02	8.999999612569809e-03
9	-3.357142806053162e-001	1.285714283585548e-02

Таблица П Г.14 – Коэффициенты денормализации

$K_{\text{оф}}^{\text{дн}}$	$K_{\text{амп}}^{\text{дн}}$
-8.374126553535461e-01	6.293706595897675e-02

Таблица П Г.15 – Сдвиги и углы наклона активационных функций j-го нейрона

№	$\theta_j^{(3)}$	$\beta_j^{(3)}$
1	9,648426770836520e-02	-1.741915345191956e-01
2	-4,855037079989010e-01	5.562574863433838e-01
3	-2,549668874172190e-01	3.729099780321121e-02
4	-2,803888058107240e-01	-3.051984310150147e-01
5	5,363628040406510e-02	-1.918736696243286e-01
6	4,103061006500440e-01	-1.340237706899643e-01
7	4,757072664571060e-01	3.133860183879733e-03
8	4,516891994994960e-01	9.241176396608353e-02
9	4,725028229621270e-01	-1.011792182922363e+00
10	-1,485183263649400e-01	-6.092785000801086e-01
11	-4,359416486098820e-01	2.215953320264816e-01
12	-1,265449995422220e-01	-8.014261722564697e-01
13	-4,950254829554120e-01	-4.332439228892326e-02

Таблица П Г.16 – Сдвиг и угол наклона активационной функции нейрона выхода

$\theta_{вых}^{(3)}$	$\beta_{вых}^{(3)}$
2,756889553514210e-01	2.017172798514366e-02

Таблица П Г.17 – Весовые коэффициенты $w_{i,j}^{(3)}$ связей i-го входа с j-м нейроном

j \ i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,10	0,23	-0,16	-0,06	-0,39	0,33	-0,10	-0,23	0,39
2	0,66	-0,01	0,28	0,25	-0,46	-0,37	-0,35	-0,37	-0,34
3	0,44	0,22	-0,06	0,09	-0,46	-0,22	-0,11	0,21	0,12
4	0,19	-0,39	-0,46	0,12	-0,43	0,14	0,21	-0,39	-0,47
5	-0,70	0,36	0,01	-0,63	0,45	0,03	0,24	0,77	0,00
6	-0,49	-0,03	-0,39	-0,16	-0,21	0,38	-0,54	0,44	0,27
7	1,15	0,28	0,23	0,45	-0,57	-0,58	0,10	-0,29	-0,84
8	1,02	0,15	-0,30	0,29	-0,52	-0,16	0,12	-0,49	-0,56
9	-1,47	0,25	0,15	-0,82	0,75	0,27	0,46	0,80	0,68
10	-2,22	0,34	-0,26	-0,88	0,74	0,52	0,02	0,90	1,26
11	0,79	0,45	0,09	0,26	-0,56	-0,49	-0,09	-0,39	-0,93
12	-1,16	-0,35	0,49	-0,23	0,17	0,40	0,17	1,22	1,32
13	1,45	-0,04	0,03	0,12	-0,28	-0,27	0,00	-0,33	-0,70

Таблица П Г.18 – Весовые коэффициенты $w_j^{(3вых)}$ связей j-го выходным нейроном

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,05	0,39	0,16	0,40	-0,31	-0,09	0,57	0,60	-0,78	-1,12	0,56	-0,81	0,61

4. Параметры модели оценки влажности $\varphi_{n=3}^{к}$.

Таблица П Г.19 –Коэффициенты нормализации

№	$K_{оф}^{н}$	$K_{амп}^{н}$
1	-7.319673299789429e-01	3.688525035977364e-02
2	-6.549999713897705e+00	2.999999821186066e-01
3	-3.549999952316284e+00	5.999999865889549e-02
4	-2.171101093292236e+00	8.256881237030029e-01
5	-1.734117627143860e+00	2.647058852016926e-02
6	-7.705250978469849e-01	2.147971466183662e-02
7	-1.827777624130249e+00	2.777777612209320e-02
8	5.000000074505806e-02	8.999999612569809e-03
9	-3.357142806053162e-01	1.285714283585548e-02

Таблица П Г.20 – Коэффициенты денормализации

$K_{\text{оф}}^{\text{дн}}$	$K_{\text{амп}}^{\text{дн}}$
-2.080419510602951e-01	6.293706595897675e-02

Таблица П Г.21 – Сдвиги и углы наклона активационных функций j-го нейрона

№	$\theta_j^{(3)}$	$\beta_j^{(3)}$
1	3,991058076723530e-01	4.349610209465027e-01
2	-9,257789849543750e-02	-5.627926439046860e-02
3	-4,545274208807640e-01	3.622863292694092e-01
4	-4,829096346934420e-01	-4.471153914928436e-01
5	-1,426282540360730e-01	4.385946989059448e-01
6	-3,398236030152290e-02	6.789722293615341e-02
7	3,066652424695580e-01	3.362967073917389e-01
8	-4,465620899075290e-01	5.574638396501541e-02
9	-3,367717520676290e-02	-3.555906116962433e-01
10	2,756584368419450e-01	-2.773515880107880e-01
11	-1,416516617328410e-01	-1.313596069812775e-01
12	4,859004486220890e-01	-4.595626592636108e-01
13	4,261452070680870e-01	-1.028315946459770e-01

Таблица П Г.22 – Сдвиг и угол наклона активационной функции нейрона выхода

$\theta_{\text{вых}}^{(3)}$	$\beta_{\text{вых}}^{(3)}$
1,796472060304570e-01	-7.117044180631638e-02

Таблица П Г.23 – Весовые коэффициенты $w_{i,j}^{(3)}$ связей i-го входа с j-м нейроном

j \ i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,40	0,04	-0,06	-0,06	-0,28	-0,12	-0,07	-0,40	-0,24
2	0,12	-0,18	0,34	0,41	0,48	0,34	-0,11	0,53	-0,28
3	-0,58	0,27	0,02	0,03	0,56	-0,31	0,46	0,22	-0,11
4	-0,49	0,02	-0,24	-0,24	0,54	0,18	0,27	-0,27	0,11
5	-0,12	0,00	0,29	0,01	-0,12	0,19	0,03	0,11	-0,10
6	-0,35	0,19	-0,43	0,18	0,21	-0,17	0,11	-0,13	-0,25
7	0,15	0,08	-0,11	0,40	0,29	-0,15	0,02	-0,23	0,39
8	0,61	0,10	-0,49	-0,10	-0,60	-0,03	-0,50	0,23	0,24
9	0,07	0,22	0,36	-0,49	-0,35	0,23	0,13	-0,26	-0,41
10	-0,52	0,12	-0,14	-0,27	0,03	0,34	0,44	0,43	0,16
11	0,22	0,29	0,39	-0,31	0,03	-0,21	-0,34	-0,45	0,27

Продолжение таблицы П Г.23

12	-0,54	-0,05	0,10	-0,25	0,18	-0,14	-0,07	-0,29	0,41
13	-0,19	-0,23	0,27	0,48	0,12	0,06	-0,03	-0,27	0,22

Таблица П Г.24 – Весовые коэффициенты $w_j^{(Звых)}$ связей j-го выходным нейроном

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,22	-0,31	-0,39	-0,31	-0,01	0,37	-0,39	0,42	-0,05	-0,49	0,28	-0,35	0,44

Приложение Д

Техническое описание установки ТОМ – 1

Установка ТОМ – 1 предназначена для термообработки магнитопроводов, включая калибровку, спекание, отжиг, охлаждение заготовок, которые изготавливаются из ленты (ширины 12,5–50 мм и толщины 0,35 мм) электротехнической стали Э330, Э320, Э310 согласно ГОСТ 9925-61, навитых на оправки. Заготовки магнитопроводов могут иметь следующие размеры:

наименьший 20×35 мм

наибольший 80×140 мм.

Установка термообработки магнитопроводов ТОМ-1 включает следующие элементы:

а) печь – ПБВ13.003.018 – 1 шт,

б) накопитель – Н-4М-ПБМ3.700.008 – 1 шт,

в) блок питания – ПБМ3.508.012 – 1 шт.

Для питания установки ТОМ-1 используется трехфазный переменный ток 50 Гц, 380/220 В. Максимальная температура в рабочей зоне установки термопары в печи – 950^{o}С. Колебание температуры в печи в зоне установки термопары не должно превышать ±10^{o}С. После 15 часового перерыва в работе печи время ее разогрева до 950^{o}С не должно превышать 3 часов.

Установка ТОМ-1 имеет автоматический бесступенчатый способ поддержания и регулировки температуры.

Максимальная потребляемая мощность – 100 к Вт.

Габаритные размеры установки:

длина – 5,01 м,

ширина – 2,32 м,

высота – 3,65 м,

Масса установки ТОМ-1 – 5 тонн 400 кг.

Устройство и работа установки термообработки магнитопроводов ТОМ-1

Установка ТОМ-1 включает полуавтоматическую печь, которая функционирует совместно с накопителем для охлаждения магнитопроводов, а также блок питания.

Печь является проходной электрической печью, которая предназначена для спекания магнитопроводов (типы магнитопроводов и рабочие режимы см. в таблице П Д.1). Печь состоит из каркаса, футеровки, сменного лотка, нагревателей. В печь помещена термопара (ТХА 0,80,6 1000^{o}С), предназначенная для измерения температуры в рабочей зоне. Электропечь содержит карбид-кремниевые нагреватели КЭН В 25/400/400.

Лоток печи оснащен кронштейном с тремя направляющими планками, которые могут быть установлены на различном расстоянии в зависимости от ширины магнитопровода за счет пазов в кронштейне. Из лотка механизмом сброса магнитопроводы направляются в накопитель.

Таблица П Д.1 – Параметры отжига магнитопроводов

Тип магнитопровода	Температура в печи (Т, ^{o}С)	Цикл (t, сек)	Давление (Р)
№1 Шл 10×16 №2 12×25 №3 12×12,5 №4 12×16 №5 12×20 №6 12×25	780–800	22–24	3,5–4
№7 Шл 16×20 №8 16×32	780–820	27–29	3,5–4
№9 Шл 20×25 №10 20×40	780–850	30–40	3,5–5
№11 Шл 25×32 №12 25×40	790–850	32–40	5,5–5,9
№13 Шл 32×40 №14 40×40	800–920	35–45	4–5
№15 КРАН 684452.002	800–950	42–50	4,5

Таблицы данных процессов нагрева

Таблица П Д.2 – Данные по неоптимальному нагреву ТОМ-1 при различных состояниях функционирования

t, мин	$H_2(h_0)$ T(t), ^{0}C	$H_2(h_1)$ T(t), ^{0}C	$H_2(h_2)$ T(t), ^{0}C	$H_2(h_3)$ T(t), ^{0}C	t, мин	H_1 T(t), ^{0}C
34	785	785	785	785	0	18
35	798	798	795	795	3	100
36	805	806	803	804	6	300
37	817	818	812	813	9	485
38	823	823	823	822	12	560
39		833	829	830	15	600
40		840	840	839	18	640
41		845	845	845	21	670
42		850	852	853	24	700
43			858	860	27	730
44				866	30	760
45				873	33	780
46				879	36	800
47				885	39	840
48				890	42	850
49				896		
50				901		
51				906		
52				910		
53				915		
54				920		
55				923		
56				927		
57				932		
58				935		
59				938		
60				942		
61				945		
62				948		
63				951		

Таблица П Д.3 – Оптимальная программа нагрева ТОМ-1 (подмножество H_1)

t, мин	u^*, В	z^*, ^{0}C
0	122.	18
1.56	109	24
3.19	97	43.9
4.82	84	75
6.44	71	116
8.05	58	165
9.7	45	221
11.32	32	283
12.95	19	348
14.58	350	416
16.21	350	474
17.83	350	522
19.46	340	554
21.09	343	570
22.71	346	586
24.34	348	602
25.97	350	618
27.59	350	633
29.22	350	649
30.85	350	665
32.48	350	680
34.10	350	696
35.73	350	712
37.36	350	727
38.98	350	741
40.61	350	756
42.24	350	770
43.86	350	784
45.49	350	788
47.12	350	812
48.75	350	824
50.37	350	837
52	350	850

Приложение Е

Технические средства реализации интеллектуальной информационно-управляющей системы вальцеленточными сушильными установками

Основой рабочего прототипа ИИУС СВЛ является промышленный контроллер WinCON 8000. В состав технического обеспечения информационно–управляющей подсистемы входят кроме него различные средства управления и измерения параметров.

Множество технических средств канала управления $\mathcal{IS}^{\text{У}}$ содержит следующие элементы.

1 Интеллектуальный датчик влажности.

2. Преобразователи частоты Е3-8100 (фирмы Веспер), обеспечивающие плавное изменение скорости движения продуктового транспортера, и управление вытяжным вентилятором.

3. Мотор-редукторы FPW640C-75E (фирмы Oriental Motor), обеспечивающие смену проходного сечения шиберов.

4. Линейные двигатели LSM-P-24-206-25 (фирмы Ruch servomotor), предназначенные для изменения проходного сечения воздухозаборов.

5. Двухпортовые односедельные клапаны LE33 (Ti-P303-01, фирмы Spirax/Sarco), обеспечивающие плавную регулировку подачи пара в калориферы каждой камеры сушильной установки.

6. Электроприводы EL5600 (Ti-P358-07, фирмы Spirax/Sarco), обеспечивающие автоматическую регулировку штока клапанов подачи пара.

Техническое обеспечение динамическими режимами многосекционных сушильных установок включает множество технических средств $\mathcal{IS}^{\text{И}}$ канала измерения информационно–управляющей подсистемы, содержащее следующие элементы.

1. Датчики термоэлектропреобразователи ТСМ-0193 (ТУ 311-002262253.035-93), служащие для замера температуры твердых, жидких,

газообразных сред, устанавливаются в каждой камере СВЛ. Измеряют температуру в диапазоне: от –50 до +150°С.

2. Восьмиканальные измерители УКТ 38-01 с сетевым адаптером АС2 предназначены для передачи температуры с входных датчиков к ЭВМ через интерфейс RS232. Пределы измерений: от –40 до +600°С. Допустимая погрешность измерения: ±0,5%.

3. Компьютерное устройство с программным обеспечением, включающим прототип ИИУС ТТА.

Рассмотренные технические средства позволяют обеспечивать оперативное управление многокамерными сушильными установками в реальном масштабе времени.

Приложение Ж
Акты внедрения и справки о практическом использовании результатов работы

"УТВЕРЖДАЮ"
Генеральный директор
АО Машиностроитель и
АО ВНИИРТМАШ
_____ Муратов С.Э.
"___" _____ 1995 г.

"УТВЕРЖДАЮ"
Проректор по научной работе
ТГТУ,
_____ Коптев А.А.
"___" _____ 1995 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Мы, нижеподписавшиеся, представители АО ВНИИРТМАШ зав. отделением АО НИИРТМАШ Шашков В.Н., ведущий конструктор Кученков В.М., с одной стороны, и представители ТГТУ начальник НИСа к.т.н., доц. Галыгин В.Е. и к.т.н., доц. Трейгер В.В., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что в результате проведения комплекса работ по снижению энергозатрат при вулканизации покрышек созданы новые модели и алгоритмы ресурсосберегающего оптимального управления процессами нагрева на множестве состояний функционирования, вошедшие в экспертную систему по энергосберегающему управлению. Модели и алгоритмы использованы в микропроцессорных управляющих устройствах, которые наряду с выполнением традиционных функций могут осуществлять оптимальное управление динамическими процессами вулканизации.

Математическое обеспечение, разработанное Артемовой С.В. содержит новый математический аппарат анализа и синтеза оптимального управления.

Внедрение результатов работы позволяет снизить расход теплоносителей в динамических режимах на 10 - 15 % , ожидаемый экономический эффект для одного аппарата составит 3 млн. руб. в год.

От ВНИИРТМАША

Зав. отделением АО НИИРТМАШ
_____ В.Н.Шашков
Ведущий конструктор
АО НИИРТМАШ
_____ В.М.Куренков

От ТГТУ

Нач. НИСа, к.т.н., доцент
_____ В.Е.Галыгин
К.т.н., доцент
_____ В.В.Трейгер

КРАТА® ТАМБОВСКОЕ ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ПИГМЕНТ

Россия, 392681, г.Тамбов, ул.Монтажников,1
ОАО"Пигмент"
Телетайп :226174РУБИН. Факс ОАО "Пигмент" (0752) 72-51-06.
Телефоны: (0752) ОЗС: 71-02-50, 72-57-51;
Отдел реализации: 71-03-41, 79-52-69, 79-54-14;
тел/факс: 71-46-67, 71-13-98
ОВЭС: тел/факс 72-26-57;
Маркетинг: тел/факс 71-46-67 , 71-13-98 ;
ФО: 79-52-70 , 79-51-28; факс: 72-00-59
internet: www.krata.tambov.ru
E-mail : info@krata.tambov.ru

ИНН 6829000074 , БИК 046850755
ОКПО - 05800142 ; ОКОНХ - 13170, 13190

№_____ от "_____"_____200___г.

на №_____ от "_____"_____200___г.

УТВЕРЖДАЮ
Директор по стратегическому
развитию ОАО «Пигмент»
_____ Г.П. Утробин
«___» _____ 2006 г.

СПРАВКА

о практическом использовании результатов научно-исследовательской работы

Настоящим подтверждается, что инженерно-технические рекомендации, являющиеся результатом научных исследований по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации в рамках раздела «Энергетика и энергосбережение», разработанные авторами д.т.н. Муромцевым Ю.Л., к.т.н. Артемовой С.В. и Грибковым А.Н. и включающие в себя практические подходы к ресурсосберегающему управлению динамическими режимами многосекционных вальце-ленточных сушильных установок приняты для использования на ОАО «Пигмент», г. Тамбова.

Разработанное программное обеспечение содержит процедуры: прогнозирования и компенсации шумов в канале управления, оптимальной фильтрации шумов в канале измерения, оперативного синтеза управляющих воздействий для различных состояний функционирования многосекционных вальце-ленточных сушильных установок.

На базе алгоритмического и программного обеспечения создана информационно-управляющая система динамическими режимами многосекционных сушильных установок, которая позволяет экономить в динамических режимах 5-10% энергоресурсов.

Главный инженер по развитию науки, техники, технологий — Ю.Д. Кадыков

Главный приборист ОАО «Пигмент» — Ю.М. Андреев

"УТВЕРЖДАЮ"
директор АОО "ЭЛТРА"
Рассказовский завод НВА
Фирсов А.Ф.
" 21 " апреля 1998 года

"УТВЕРЖДАЮ"
проректор по научной
работе и инновациям ТГТУ
Калинин В.Ф.
апреля 1998 года

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Мы, нижеподписавшиеся, представители НВА главный инженер НВА Тарасов В.В., главный технолог Желтов А.М., с одной стороны, и представители ТГТУ начальник НИСа к.т.н., доц. Галыгин В.Е. и к.т.н., доц. Трейгер В.В., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что в результате проведения комплекса работ по энергосбережению динамики нагрева установки термообработки магнитопроводов ТОМ-1, были созданы новые модели и алгоритмы энергосберегающего оптимального управления процессами нагрева на множестве состояний функционирования. Модели и алгоритмы использованы в микропроцессорных управляющих устройствах, которые на ряду с выполнением традиционных функций могут осуществлять оптимальное управление динамическими режимами процесса нагрева печи.

Математическое обеспечение, разработанное Артемовой С.В. содержит новый математический аппарат анализа и синтеза оптимального управления.

Внедрение результатов работы позволяет снизить затраты энергии на нагрев установки термообработки магнитопроводов на 15-17%.

ОТ АОО "ЭЛТРА"
Гл. Инженер НВА
В.В.Тарасов
Гл. Технолог НВА
А.М.Желтов

ОТ ТГТУ
Нач. НИСа к.т.н.,доцент
В.Е. Галыгин
К.т.н. доцент
В.В. Трейгер

УТВЕРЖДАЮ
Директор по производству
ОАО «Пигмент»
_____Митин Н.А.
«6» 04 2009 г

Справка
об использовании научно-исследовательской разработки

Научно - исследовательская разработка «Информационная система управления многосекционными вальце-ленточными сушильными установками», выполненная под руководством к.т.н. Артемовой С.В., и при участии следующих авторов: к.т.н. Грибкова А.Н., к.т.н. Брянкина К.В., Каменского А.М, переданная для использования на ОАО «Пигмент» г.Тамбов включает в себя:

- алгоритмы и программные модули их реализующие, предназначенные для определения оптимальной скорости движения ленты многосекционной вальце-ленточной сушильной установки, в основе работы которых лежат методы искусственного интеллекта;

- базы данных и знаний, содержащие лингвистические переменные, функции принадлежности термов лингвистических переменных, правила нечеткого вывода.

Применение указанной разработки позволяет достигать требуемого влагосодержания выпускаемого материала без снижения производительности сушильной установки.

Главный инженер производства пигментов,
красителей ОАО «Пигмент» Стрельчук В.В.

Начальник цеха №15 ОАО «Пигмент» Мельников А.А.

УТВЕРЖДАЮ

Директор по производству

ОАО «Пигмент»

_____Митин Н.А.

«_6_»_____04_____ 2009 г

Заключение

о практическом применении научно-технической разработки

Научно - техническая разработка информационная измерительно-вычислительная система (ИИВС) «Интеллектуальный датчик влажности» предназначена для определения влагосодержания пастообразного материала в процессе его сушки в камерах с максимальным влагосъемом сушильной установки вальце - ленточного типа.

Применение ИИВС «Интеллектуальный датчик влажности» позволяет значительно повысить оперативность контроля влагосодержания пастообразного материала по сравнению с известными средствами указанного назначения.

В разработке методов, алгоритмов, программного, технического обеспечения ИИВС «Интеллектуальный датчик влажности», а также в испытании устройства принимали непосредственное участие Артемова Светлана Валерьевна, Грибков Алексей Николаевич, Брянкин Константин Вячеславович, Каменский Антон Михайлович.

Разработанная ИИВС «Интеллектуальный датчик влажности» внедрена на ОАО «Пигмент».

Главный инженер производства пигментов, красителей ОАО «Пигмент» Стрельчук В.В.

Начальник цеха №15 ОАО «Пигмент» Мельников А.А.

СОГЛАСОВАНО
Проректор по научной
работе ГОУ ВПО «ТГТУ»
_____ С.И. Дворецкий
«6» 04 2009 г

УТВЕРЖДАЮ
Директор по производству
ОАО «Пигмент»
_____ Митин Н.А.
«6» 04 2009 г

АКТ
о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Научно-исследовательская работа ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» (кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», авторы: к.т.н. С.В. Артемова, к.т.н. А.Н. Грибков, А.М. Каменский, а также кафедра «Химические технологии органических веществ», авторы: д.т.н. А.И. Леонтьева, к.т.н. К.В. Брянкин, к.т.н. В.С. Орехов), а именно «Разработка информационной измерительно-управляющей системы сушильными установками вальцеленточного типа (СВЛ)», заключающаяся в исследовании динамических режимов работы технологического оборудования сушильных установок и кинетики процесса сушки с целью получения моделей, методов, алгоритмов, программ и технических решений, пригодных для управления по критериям: энергосбережение, точность выхода на заданный режим, качество выпускаемой продукции и производительность, а также внедрения результатов исследования в цехе №15 ОАО «Пигмент», г. Тамбов.

Назначение внедренной разработки: экономия энергоресурсов в динамических режимах работы технологического оборудования сушильных установок (двигатели, калориферы), без снижения качества выпускаемой продукции (пигмент рубиновый ВКС/2) и производительности процесса сушки.

Уровень разработки: методы, алгоритмы и программы энергосберегающего управления динамическими режимами технологического оборудования СВЛ; мониторинг влагосодержания пастообразного материала в процессе сушки в камерах максимального влагосъема с применением созданной информационной измерительно-вычислительной системы (ИИВС) «Интеллектуальный датчик влажности»; способ управления скоростью движения ленты с целью гарантированного достижения заданного качества пастообразного материала без снижения производительности процесса его сушки.

Вид внедрения: алгоритмическое, программное и техническое обеспечение измерительно-управляющей системы сушильными установками.

Эффективность внедрения

1. Применение ИИВС «Интеллектуальный датчик влажности» позволяет значительно повысить оперативность контроля влагосодержания пастообразного материала по сравнению с известными средствами указанного назначения.

2. Экономический эффект от внедрения созданной информационной измерительно-управляющей системы позволяет достигать 5-10% экономии энергоресурсов в динамических режимах и поддерживать заданное качество выпускаемой продукции без снижения производительности процесса сушки.

От ГОУ ВПО «ТГТУ»
Начальник научно-исследовательского сектора
В.Е. Галыгин

Руководитель темы
С.В. Артемова

От ОАО «Пигмент»
Главный инженер производства пигментов, красителей
Стрельчук В.В.

Начальник цеха №15
Мельников А.А.

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Тамбовское спиртоводочное предприятие «Талвис»
(ОАО «Талвис»)

Юридический адрес: 392023, г. Тамбов, ул. Андреевская, д. 33
Адрес для корреспонденции: 392515, Тамбовская обл., Тамбовский р-н, р.п. Новая Ляда, ул. Советская, 184 «е»
Телефон: (4752) 656-000, Факс: (4752) 656-198, e-mail: talvis-info@spi-group.com
ОКПО 00339141, ОГРН 1026801159032, ИНН 6831000321, КПП 997350001

ОАО «Талвис»
АКТ
№

г. Тамбов

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ОАО «Талвис»
М.А. Погодина
2012г.

О внедрении

Мы, нижеподписавшиеся, представители ОАО «Талвис» главный инженер Смольянинов В.Н. и руководитель службы ИТ Макаш И.С. с одной стороны, и представители ФБГОУ ВПО «ТГТУ» д.т.н., профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Шамкин В.Н., д.т.н., профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Селиванова З.М., с другой стороны, составили настоящий акт о разработке и изготовлении интеллектуальной информационно-управляющей системы тепло-технологическими аппаратами (ИИУС ТТА).

Применение ИИУС ТТА позволяет снизить в динамических режимах энерго- и ресурсозатраты на 5-20% в зависимости от используемого оборудования по сравнению с известными аналогами.

В разработке методов, алгоритмов, программного обеспечения ИИУС ТТА принимали непосредственное участие Артемова Светлана Валерьевна, Грибков Алексей Николаевич, Куркин Илья Александрович.

Разработанная ИИУС ТТА внедрена на ОАО «Талвис».

Данный акт внедрения не ведет к взаимным финансовым расчетам.

Составлен в 2 экземплярах.

1-ый экз. – ОАО «Тамбовское спиртоводочное предприятие «Талвис»;
2-ой экз. – ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Представители ОАО «Тамбовское
спиртоводочное предприятие «Талвис»
Главный инженер В.Н Смольянинов

Руководитель службы ИТ И.С. Макаш

Представители ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
Профессор кафедры КРЭМС, д.т.н. Шамкин В.Н.

Профессор кафедры КРЭМС, д.т.н. З.М. Селиванова

В дело №
И.С. Макаш
(4752) 656-178