

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

**С. В. АРТЕМОВА, А. А. АРТЕМОВ, М. А. КАМЕНСКАЯ**

**МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ  
СИСТЕМЫ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
АППАРАТАМИ**

Рекомендовано Научно-техническим советом университета  
в качестве монографии



---

Тамбов  
Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2017

УДК 681.5.01  
ББК 3973  
А86



Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,  
Почетный работник ВПО РФ, профессор кафедры  
«Информационно-измерительная и биомедицинская техника»  
ФГБОУ ВО «РГРТУ»

*Е. М. Прошин*

Доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный работник ВШ РФ, заведующий кафедрой  
«Информационно-измерительная и биомедицинская техника»  
ФГБОУ ВО «РГРТУ»

*В. И. Жулев*

**Артемова, С. В.**

А86

Методология проектирования интеллектуальной информационно-управляющей системы тепло-технологическими аппаратами : монография / С. В. Артемова, А. А. Артемов, М. А. Каменская. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – 196 с. – 300 экз.  
ISBN 978-5-8265-1765-9

Рассматривается решение проблемы минимизации энерго- и ресурсопотребления, потеря качества производимой продукции и производительности технологических процессов на основе разработки методологии алгоритмизации синтеза управляющих воздействий в реальном масштабе времени для интеллектуальных информационно-управляющих систем (ИИУС) различными тепло-технологическими аппаратами (ТТА), функционирующими на множестве состояний.

Сформулированы и решены следующие задачи: разработка методологии проектирования ИИУС системы, инвариантной различным ТТА, позволяющей оперативно решать задачи управления режимами по качественным, энергетическим и другим критериям; разработка технологии алгоритмизации синтеза управляющих воздействий в реальном масштабе времени без участия лица, принимающего решение; создание моделей и алгоритмов управления различными режимами ТТА с учетом множества состояний функционирования, пригодных для использования в ИИУС; разработка методики построения архитектур ИИУС ТТА и выбора наиболее перспективной архитектуры из множества альтернативных по критерию приведенных затрат, зависящему от принимаемых проектных решений.

Предназначена для научных работников, инженеров, студентов, магистрантов, аспирантов.

УДК 681.5.01  
ББК 3973

*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 17-18-00076, не подлежит продаже*

ISBN 978-5-8265-1765-9

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2017  
© Артемова С. В., Артемов А. А., Каменская М. А., 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ ...	6
ВВЕДЕНИЕ .....	14
1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮ- ЩИХ СИСТЕМ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	19
1.1. Методы и алгоритмы построения системы .....	19
1.2. Этапы методологии построения системы .....	23
1.3. Технологии построения системы .....	24
1.4. Модель предметной области .....	28
1.5. Интегрированный граф метода алгоритмизации синтеза решения задач управления режимами тепло-технологических аппаратов, использующий фреймы знаний .....	37
2. ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИИУС ТТА ....	43
2.1. Структурное построение выбора оптимального проектного решения архитектуры ИИУС ТТА .....	43
2.2. Энерго- или ресурсосберегающее управление с учетом дестабилизирующих факторов и смены состояний функцио- нирования .....	54
2.3. Задачи управления режимом «Процесс» на примере вальцеленточных сушильных установок .....	59
3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ И ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВ- ЛЯЮЩИМИ СИСТЕМАМИ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ .....	71
3.1. Оперативная идентификация моделей динамики, описы- вающих объект на множестве состояний функционирования с учетом его нелинейностей .....	71
3.2. Идентификация моделей динамики многокамерного ТТА с учетом стадий разогрева и влияния соседних камер, пригод- ных для решения задач оптимального управления .....	77

3.3. Методика идентификации математических моделей процессов режима «ПУСК» на множестве состояний функционирования .....	79
3.4. Аналитическая модель оценки влажности пастообразного материала в процессе его сушки в вальцеленточной сушильной установке .....	80
3.5. Процедурная модель классификации возможных ситуаций в ТТА .....	85
4. АНАЛИЗ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МСФ .....	90
4.1. Режим «ПУСК» .....	90
4.2. Режим «ПРОЦЕСС» на МСФ .....	99
5. СТРАТЕГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	105
5.1. Расширенные стратегии энерго- и ресурсосберегающего управления с учетом наличия ДФ в каналах управления и измерения режима «ПУСК» .....	105
5.2. Методика интеллектуального синтеза управляющего воздействия на МСФ режима «ПУСК» при реальной эксплуатации ИИУС ТТА без лица, принимающего решение .....	110
5.3. Алгоритмы управления в реальном масштабе времени тепло-технологическими процессами .....	111
5.4. Разработка и усовершенствование алгоритмов ИИУС ТТА на примере алгоритма позиционного энергосберегающего управления .....	122
5.5. Метод настройки адаптивного регулятора с применением нечеткой логики .....	129
6. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ .....	135
6.1. Особенности математического и программного обеспечения .....	135
6.2. Информационное и интеллектуальное обеспечение .....	138
6.2.1. Базы данных и знаний ИИУС ТТА .....	141

6.3. Рабочий прототип ИИУС СВЛ .....	151
6.4. Особенности технического обеспечения .....	154
6.5. Метрологический анализ системы .....	155
7. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИИУС ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТТА .....	159
7.1. Примеры синтеза управляющих воздействий в режиме «ПУСК» вальце ленточных сушильных установок .....	159
7.2. Примеры синтеза управляющих воздействий в режиме «ПРОЦЕСС» вальцеленточных сушильных установок .....	167
7.3. Примеры синтеза энергосберегающего управления режимом «ПУСК» установки отжига магнитопроводов (ТОМ-1) .....	181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	189
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	192

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

---

### *Аббревиатуры:*

А	– аperiodическое звено;
АКОР	– аналитическое конструирование оптимальных регуляторов;
БД	– база данных;
БЗ	– баз знаний;
В	– высокая;
ВД	– выше допустимой;
Д	– допустимая;
ДА	– двойное аperiodическое 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	– термоотжиг магнитопроводов;
ТТА	– тепло-технологические аппараты;

*Условные обозначения:*

$A_{i\mu}^Y, A_{i\mu}^I$	– $i$ -й алгоритм соответствующих подсистем;
$K_0$	– класс ситуаций, характеризующийся тем, что значения влажности материала в контролируемых камерах принадлежат допустимому диапазону;
$K_{Пр}$	– 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;
$K_n$	– класс ситуаций, характеризующийся тем, что значения влажности материала в $n$ -й камере выходят за допустимые пределы, а в $(n + 1)$ -й камере – принадлежат допустимому диапазону;
$K_{n+1}$	– класс ситуаций, характеризующийся тем, что значения влажности материала в $n$ -й камере принадлежат допустимому диапазону, а в $(n + 1)$ -й камере – выходят за допустимые пределы;
$K_{n, n+1}$	– класс ситуаций, характеризующийся тем, что значения влажности материала в обеих контролируемых камерах выходят за допустимые пределы;

$M_{ИУПС}$	– модели информационно-управляющей и информационно-измерительной подсистем;
$M_{ИИПС}$	
$M_{\eta}^O$	– морфологическая модель объекта;
$IE_{ji}^O, IE_{ji}^И$	– $j$ -й информационный элемент $i$ -го алгоритма подсистемы;
$h$	– состояние функционирования;
$u(t)$	– управляющее воздействие;
$\vec{u}$	– вектор управляющих воздействий;
$t_0$	– начало временного интервала управления;
$t_k$	– конец временного интервала управления;
$z^0$	– начальное значение вектора $z$ ;
$z^k$	– конечное значение вектора $z$ ;
$u_n$	– нижняя граница управления;
$u_b$	– верхняя граница 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);
<b>A, B, C</b>	– матрицы параметров модели объекта;
$M_{ИИ}$	– информационная модель интеллектуального интерфейса;
$\mathcal{DS}$	– множество сценариев диалогов;
$\mathcal{Pol}$	– множество пользователей системы;
$\mathcal{P}_o$	– множество программного обеспечения;
$\mathcal{TS}$	– 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;



$S^{DS}$	– разработки сценариев диалога;
$S^{gS}$	– технических средств системы;
$S^{P_0}$	– программного обеспечения;
$S^{\varepsilon}$	– приведенная стоимость эксплуатации ИИУС ТТА.
$x_{i,\mu}^Y, x_{i,\mu}^I$	– массивы принадлежности $i$ -го алгоритма $\mu$ -му модулю соответствующих подсистем;
$y_{j,i}^Y, y_{j,i}^I$	– массивы принадлежности $j$ -го информационного элемента $i$ -му алгоритму соответствующих подсистем;
$z_{\mu,j}^Y, z_{\mu,j}^I$	– массивы взаимосвязи модулей с информационными элементами;
$V$	– суммарный объем памяти;
$N_{\mu}^Y, N_{\mu}^I$	– максимально допустимое количество алгоритмов в модулях; $D^Y, D^I$ ;
$q_{ts}^Y, q_{ts}^I$	– 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);
$S_{пр}$	– программная стратегия управления (Пр);
$S_{пз}$	– позиционная стратегия управления (Пз);
$H_i^{мд}$	– множество внутренних факторов, связанных с изменением вида и параметров моделей динамики;
$H^{кф}$	– множество факторов, косвенно влияющих на управляющие воздействия;
$H^{oc}$	– множество факторов изменения окружающей среды (температура, влажность, давление и т.д.);
$H_i^{дф}$	– множество дестабилизирующих факторов в каналах управления и измерения;
$H^P$	– множество состояний работоспособности;
$H_B$	– подмножество наиболее вероятных состояний (состояния с нормальной работоспособностью элементов);
$H_K$	– подмножество наиболее критических состояний (состояния с отказами технических средств);
$M_h$	– множество математических моделей ИИУС ТТА;
$E_{доп}$	– 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;
$\Phi_k^x$	– 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 $m$ -й партии материала в $n$ -й камере;
$A_n$	– массив параметров модели для определения влажности материала в центре $n$ -й лимитирующей камеры;
$u_n$	– векторы управляющих воздействий;
$x_n$	– векторы возмущающих воздействий;
$U_n^{\text{доп}}$	– область допустимых значений управляющих воздействий $n$ -й лимитирующей камеры;
$Y_n^{\text{доп}}$	– область допустимых значений влажности в $n$ -й лимитирующей камере сушильной установки;
$Q_n$	– минимизируемый функционал потерь качества и производительности;
$u_n^*$	– корректирующее воздействие;
$R$	– массив параметров задачи;
$t_{n+1}^m, t_k^m$	– моменты времени определения влажности $m$ -й партии материала в $(n+1)$ -й лимитирующей и конечной камерах соответственно;
$A_{n+1}$	– массив параметров модели для расчета влажности в $(n+1)$ -й лимитирующей камере;
$K_{\text{амп}}^H, K_{\text{оф}}^H$	– амплитудный и офсетный коэффициенты нормализации;

$w_{i,j}^{(n)}$ ,	– весовые коэффициенты связей нейронов;
$w_j^{(n \text{ Вых})}$	
$N_i$	– число нейронов в скрытом слое нейронной сети;
$\frac{\quad}{\quad}$	– нормализованное значение влажности материала;
$\frac{\quad}{\quad}$	– нормализованное значение начальной влажности материала;
$\frac{\quad}{\quad}$	– нормализованные значения температуры и влажности окружающей среды;
$\frac{\quad}{\quad}$	– нормализованное значение скорости движения пластинчатого конвейера;
$\frac{\quad}{\quad}$	– нормализованное значение наличия или отсутствия ворошителя;
$\frac{\quad}{\quad}$	– нормализованное значение процента времени работы вытяжного вентилятора;
$\frac{\quad}{\quad}$	– нормализованные значения температуры и влажности сушильного агента;
$\frac{\quad}{\quad}$	– нормализованные значения процента открытия воздухозаборного окна и сбросного шиберы;
$\frac{\quad}{\quad}$	– значение влажности в натуральном масштабе;
$\Phi_i$	
$K_{\text{амп}}^{\text{дн}}, K_{\text{оф}}^{\text{дн}}$	– амплитудный и офсетный коэффициенты денормализации;
$A$	– событие «процесс сушки завершится хорошо»;
$B$	– событие «процесс сушки завершится удовлетворительно»;
$C$	– событие «процесс сушки завершится плохо»;
$Q$	– 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;
$u_{\text{н}}, u_{\text{в}}$ ,	– границы изменения управляющего воздействия и шума;
$w_{\text{н}}, w_{\text{в}}$	
$w_i, v_i$	– «белые» или «цветные» шумы в каналах управления и измерения с нулевыми средними и среднеквадратическими отклонениями $\sigma_w$ и $\sigma_v$ соответственно;

- $F, G, a, b$  – параметры модели динамики объекта;  
 $J_3$  – 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;  
 $\bar{w}$  – математическое ожидание  $w_i$ ,  
 $N_B$  – объем выборки;  
 $P_i$  – дисперсия ошибок фильтрации;  
 $u_{k\text{ад}}^*(t)$  – адаптивное управление;  
 $u_k^{pz}(t)$  – позиционное управление,  
 $u_k^{pr}(t)$  – программное управление;  
 $c$  – весовой коэффициент;  
 $\Phi_n$  – лингвистическая переменная «влажность материала на выходе  $n$ -й камеры»;  
 $\Phi_{n+1}$  – лингвистическая переменная «влажность материала на выходе  $(n + 1)$ -й камеры»;  
 $M_k^K$  – лингвистическая переменная «мера доверия к качеству выпускаемого материала»;  
 $U^{\text{сл}}$  – 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;  
 $\eta$  – номер объекта;  
 $\rho$  – параметр прогнозирующей модели;  
 $\sigma_w^2$  – дисперсия  $w_i$ ;  
 $\gamma^*$  – оптимальный вариант архитектуры ИИУС ТТА;  
 $\gamma^Y, \gamma^И$  – количество различных вариантов ИУПС и ИИПС;  
 $\delta t$  – число шагов;  
 $\lambda_i, \rho_i$  – возмущающие воздействия со стороны соседних камер СВЛ слева и справа;

- $\mu_i$  – модель  $i$ -й камеры;
- $\chi$  – допустимая область изменения траекторий фазовых координат;
- $\Theta$  – число входов нейронной сети для расчета влажности  $\phi_i^k$  в  $i$ -й 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.

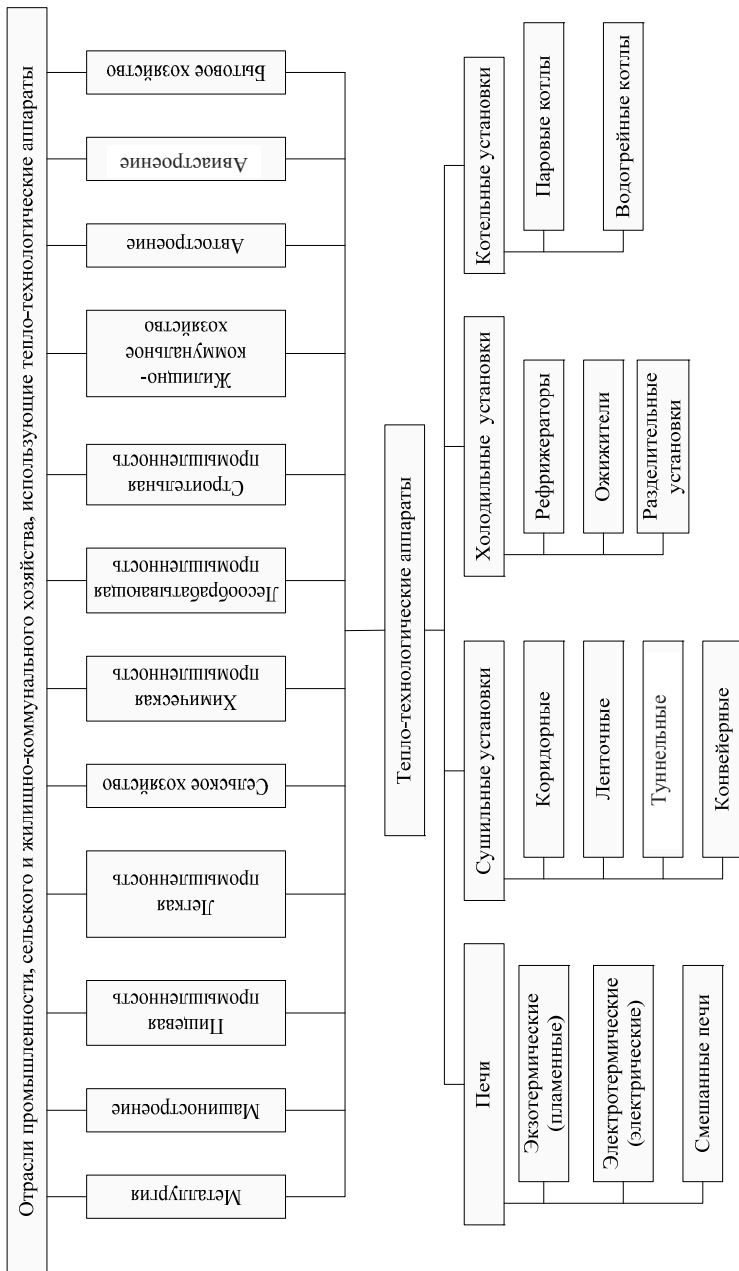
## ВВЕДЕНИЕ

---

Одним из приоритетов научно-технического прогресса на современном этапе во всем мире стала проблема энерго- и ресурсопотребления. По данным Европейской комиссии ООН уровень полезного использования энергоресурсов составляет лишь 40%, для полезного конечного использования топлива – менее 20%. Развитие отечественной промышленности и других отраслей производства ведет к значительному росту потребления топливно-энергетических ресурсов.

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

К наиболее энергоемким объектам управления 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 (рис. 1).



**Рис. 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 энергоресурсов;
- высокие требования к поддержанию технологических режимов;
- необходимость учета взаимного влияния составляющих ТТА камер друг на друга;
- наличие дестабилизирующих факторов в каналах управления и измерения;
- изменение основных режимных параметров объекта управления в процессе его реальной эксплуатации.

Вектор управления может содержать два типа компонентов – 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.

ТТА предлагается рассматривать как взаимосвязанные совокупности оборудования их составляющие (как правило, в состав ТТА входит оборудование для подачи тепла и оборудование, осуществляющее движение рабочих органов); при постановке и решении задач анализа и синтеза управления на множестве состояний функционирования различаются такие режимы работы оборудования, как «ПУСК» и «ПРОЦЕСС». Под режимом «ПУСК» понимаются управляемые динамические процессы запуска оборудования, а под режимом «ПРОЦЕСС» – управляемые статические тепло-технологические процессы функционирования ТТА.

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



$$\Phi = Q(\Delta Q_p, \Delta P_z, \vec{x}, \vec{u}) \rightarrow \min_{\vec{u}},$$

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

Важным ресурсом модернизации является разработка и внедрение интеллектуальных информационно-управляющих систем для различных отраслей промышленности, позволяющих в реальном масштабе времени вырабатывать управляющие воздействия, минимизирующие энерго- или ресурсопотребление в динамических режимах и минимизирующие потери качества и производительности тепло-технологических процессов.

Представителями промышленных предприятий предъявляются жесткие требования к разработчикам систем управления. Эти требования, в первую очередь, относятся к поддержке распределенных ресурсов, работе в сетевой среде и реальном времени, использованию многозадачных и многопользовательских режимов, интеграции с верхним уровнем управления, открытости и низкой цене.

В области проектирования информационно-управляющих систем наметились следующие тенденции: многократное ускорение темпов работ, постоянно возрастающая степень унификации технических и программных средств, быстрый рост числа SCADA-пакетов, возрастающая роль стандартов при проектировании систем, быстрая смена поколений программно-технических комплексов (как у зарубежных, так и отечественных фирм), быстрый рост внедряемых систем управления во всех отраслях народного хозяйства, в первую очередь, в нефтехимии, нефтепереработке, газовой промышленности, металлургии и энергетике.

Поэтому тематика проекта является крайне актуальной и важной для мировой промышленности.

Следует отметить, что управление энергоемкими объектами имеет ряд особенностей. Требуется проведение исследовательских работ, после выполнения которых можно использовать готовые программные продукты типовых SCADA-систем или CALS-технологий. Несмотря на то, что многие SCADA-системы, используемые как в России, так и за рубежом, позволяют решать проблемы автоматизированной разработки программного обеспечения для систем управления, в характеристиках этих систем отсутствуют сведения об алгоритмах, синтезирующих в реальном времени энергосберегающие управ-

ляющие воздействия. 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. Одновременное использование перечисленных критериев при решении задач управления, противоречиво влияющих друг на друга, значительно усложняет как математическое, алгоритмическое, информационное, программное, так и техническое обеспечение проектируемой системы. 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 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. Недостаточная теоретическая подготовка пользователей и недостаточное использование опыта и знаний экспертов в соответствующей предметной области также требует 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 достичь заданного уровня качества выпускаемой продукции без снижения производительности технологического процесса.

# 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИИУС ТТА

---

Раздел посвящен 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: 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 трудноформализуемых задач режима «Процесс»; технология интеллектуализации синтеза решения задач управления режимами «Пуск» и «Процесс» ТТА, реализованная в виде интегрированного графа.

## 1.1. 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.

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

Кроме того, при разработке математического и алгоритмического обеспечения ИИУС ТТА были развиты методы и алгоритмы адаптивного и робастного управления, с учетом особенностей ТТА, а также использованы методы искусственного интеллекта для решения трудноформализуемых задач (см. табл. 1.1).

### 1.1. Задачи ИИУС ТТА, решаемые с использованием методов искусственного интеллекта

Задачи	Методы
Параметрическая идентификация моделей слабоформализованных 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

Задачи	Методы
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

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. Исследовательский прототип ИИУС ТТА, созданный с применением предложенных в данной работе методов и алгоритмов, позволяет получать модели с разрывной правой частью переменной структуры, адекватно описывающие динамические режимы «пуска» тепло-технологического оборудования. Идентификация аналитических моделей трудноформализуемых процессов ТТА (режим «процесс») проведена с использованием нейронных сетей. 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.

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

Целями функционирования ИИУС ТТА являются минимизация энерго- и ресурсопотребления 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. 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».

В основе функционирования ИИУС ТТА лежат следующие разработанные алгоритмы:

- синтез оптимальной программы управления при использовании многостадийных моделей режима «Пуск»;
- синтез 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);
- синтез управления режимом «Процесс»;
- управление нагревом многокамерного ТТА (комбинированный);
- функционирование интеллектуального датчика влажности (адаптивный).

Синтез управляющих воздействий в режиме «процесс» требует проведения исследований конкретных тепло-технологических процессов ТТА. В данной работе в качестве ТТА рассмотрены следующие объекты управления:

- сушильные установки вальцеленточного 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, реализованная в конкретном образце. В основе этой методики лежат метод оценки влажности пастообразного материала 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.

В целях минимизации потерь качества и производительности процесса в основу интеллектуального синтеза управляющих воздейст-

вий положен метод сушки пастообразных материалов с изменением скорости пластинчатого конвейера. Для разработки этого метода в результате проведенного анализа на множестве состояний функционирования выделены классы ситуаций, для которых определены различные алгоритмы управления. Важным этапом разработки является введение входных и выходных лингвистических переменных. В качестве входных использованы функции принадлежности следующих термов лингвистических переменных влажности материала в лимитирующих 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.

Нечеткий вывод в реальном времени осуществляется с использованием продукционных правил Мамдани, соответствующих выделенным классам. Преобразование выходной переменной в численное значение производится с использованием трех различных методов: метод центра тяжести, метод медианы и метод первого максимума. На основании полученных значений формируется интервал допустимого изменения управляющих воздействий, для которого минимизируется функционал, учитывающий потери от снижения качества конечной продукции и производительности. Оценка влажности пастообразного материала проводится посредством интеллектуального датчика влажности.

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

## 1.2. ЭТАПЫ МЕТОДОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ

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

1. Этап *анализа предметной области*, на котором исследуются и классифицируются по типам решаемых задач объекты, составляющие ТТА, для которых определяются: режимы работы, множество состояний функционирования, функциональные особенности ИИУС ТТА, структура и тип ИИУС ТТА, т.е. выделяются по функциональному назначению главные подсистемы, составляющие основную систему, определяются информационные особенности системы, информационные потоки и связи подсистем, формулируются цели и задачи функционирования ИИУС ТТА, определяются оценки эффективности

создаваемой ИИУС ТТА, создаются концептуальная и информационные модели предметной области ИИУС ТТА.

2. Этап **постановки задач**, на котором формулируются постановки задач: структурного построения ИИУС ТТА, энерго- или ресурсосберегающего управления режимом «Пуск», управления режимом «Процесс» в целях 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 **интеллектуализации синтеза решения задач управления**, на котором производится построение интегрированного графа технологии интеллектуализации синтеза.

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.

### 1.3. ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ

Задачи структурного синтеза проектных решений, с точки зрения возможности формализации, относятся к числу наиболее сложных и трудноформализуемых. Это связано с тем, что, с одной стороны,



свойства синтезируемого объекта зависят от большого числа зачастую случайных, противоречивых и не до конца исследованных факторов. С другой стороны, при решении задачи синтеза часто приходится выбирать вариант из множества очень большой конечной или даже счетной мощности. Кроме того, если задача синтеза поставлена в терминах некоторой формальной системы, то для реализации такого выбора необходимо решить задачу очень высокой размерности.

Постановки задач построения связаны со стадиями процесса проектирования ИИУС ТТА. В процессе проектирования систем выделяются следующие стадии: предварительного, технического и рабочего проектирования. Можно говорить о процессе синтеза, который состоит из последовательности процедур, упорядоченных согласно декомпозиции процесса проектирования на стадии. Эта упорядоченность процедур синтеза такова.

На стадии предварительного проектирования синтезируются основные, принципиальные решения, определяющие 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.

На стадии технического проектирования синтезируются проектные решения, уточняющие и 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.

На стадии рабочего проектирования синтезируются все параметры и разрабатывается документация на ИИУС ТТА.

Предлагается при построении структуры ИИУС в постановку задачи включать в качестве исходных данных следующие сведения:

- типы допустимых для использования технических средств, выполняющих функции системы;
- множество внешних источников и потребителей информации;
- некоторую исходную структуру системы в виде взаимосвязанной совокупности программно-аппаратных средств определенных

типов, которая может рассматриваться как вариант первого приближения; различного рода ограничения, в частности, ограничения на затраты материальных ресурсов и(или) на времена выполнения функций системы.

Под структурой ИИУС ТТА будем понимать совокупность составляющих ее элементов и связей между ними. Результатом решения задачи структурного построения является проектное решение архитектуры ИИУС ТТА.

При построении архитектуры должны учитываться следующие свойства:

- 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);
- ремонтпригодность (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, реализующие решения задач ИИУС ТТА.

Декомпозиция технологий построения ИИУС ТТА на стадии проектирования представлена в табл. 1.2. При этом, на основании анализа предметной области определяются информационные особенности системы, информационные потоки и связи подсистем и обеспечивается экстремум заданного критерия разбиения, учитывающего удобство последующего детального анализа, разработки и внедрения ИИУС ТТА.

## 1.2. Декомпозиция технологий построения ИИУС ТТА на стадии проектирования

Стадии проектирования		
Предварительное	Техническое	Рабочее
<p>Принимаются основные принципиальные решения, составляющие информационную концепцию ИИУС ТТА. При этом выполняется:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Анализ предметной области, в результате которого определяется информационная модель ТТА:               <ul style="list-style-type: none"> <li>– состав ТТА;</li> <li>– множество состояний функционирования ТТА;</li> <li>– режимы работы;</li> <li>– цели управления;</li> <li>– постановка задач управления.</li> </ul> </li> <li>2. Формулировка цели и задачи функционирования ИИУС ТТА.</li> <li>3. Выделение по функциональному назначению подсистем, составляющих основную систему.</li> <li>4. Определение информационных особенностей и оценок ее эффективности.</li> <li>5. Формулировка требований пользователей ИИУС ТТА к ее эффективности и качеству</li> </ol>	<p>Разрабатываются проектные решения, уточняющие и реализующие техническую концепцию ИИУС ТТА. При этом выполняется:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Построение интегрированного графа технологии интеллектуализации синтеза.</li> <li>2. Определение комплекса технических и программно-аппаратных средств, на базе которого реализуется ИИУС ТТА.</li> <li>3. Построение оптимальной структуры алгоритмического и программного обеспечения ИИУС ТТА.</li> <li>4. Построение информационных потоков и связей подсистем.</li> <li>5. Построение функциональных программных модулей.</li> <li>6. Разработка логической и физической структуры базы данных; построение базы знаний</li> </ol>	<p>Реализуются решения задачи построения ИИУС ТТА. При этом выполняется:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Разработка программных и аппаратных модулей ИИУС ТТА, которые реализуют полученные алгоритмы.</li> <li>2. Реализация методов анализа синтеза и имитационного моделирования ИИУС ТТА.</li> <li>3. Обработка результатов тестирования.</li> <li>4. Разработка документации на ИИУС ТТА</li> </ol>

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 слабосвязанных частей. Слабая связь между частями системы означает отсутствие обратных связей, а также интенсивного обмена информацией.

Для минимизации числа информационных связей системы большое значение при проектировании ИИУС ТТА имеют задачи типизации проектных решений при разработке алгоритмического, программного и информационного обеспечения создаваемых ИИУС различными ТТА. Под типизацией понимается процесс анализа требований и характеристик заданного множества объектов, требующих энергичного ресурсосберегающего управления, и выбора из многообразия методов синтеза управляющего воздействия ограниченного множества решений, достаточно эффективно выполняющих поставленные цели управления.

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

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. В качестве цели проектирования целесообразно выбрать обеспечение гарантированного минимума затрат любого вида.

#### **1.4. МОДЕЛЬ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ**

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.

Концептуальная модель предметной области, представленная на рис. 1.1, отражает базовую структуру ТТА и совокупность задач, решаемых на различных уровнях абстракции ИИУС, в целях оперативного синтеза оптимального управления.

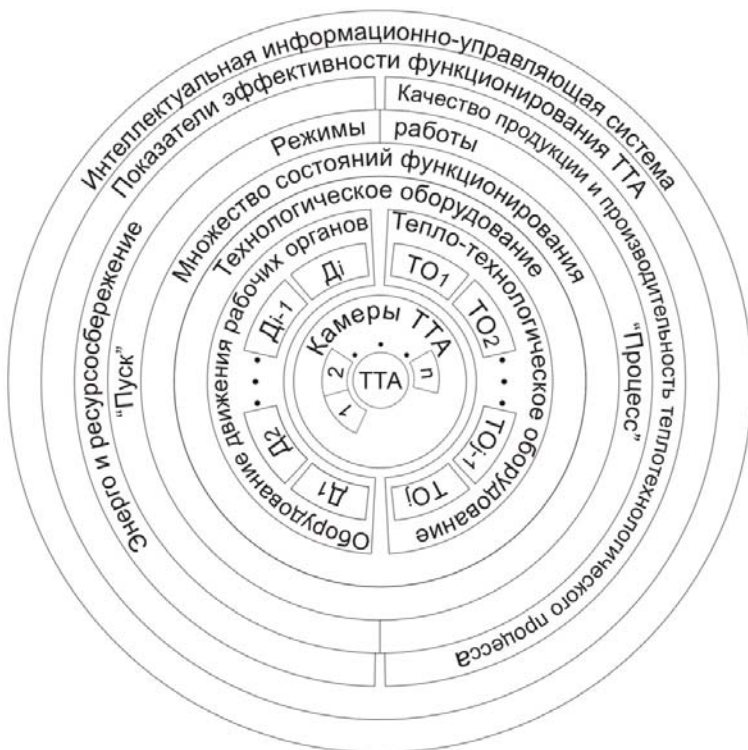


Рис. 1.1. Концептуальная модель предметной области

Результатом анализа предметной области является ее информационная модель, имеющая иерархическую структуру. Верхний уровень иерархии занимает информационная модель предметной области  $M_{\text{ПО}}$ . Формально она отражает описание типовых сущностей (состава) моделей комплекса и набора связей между ними

$$M_{\text{ПО}} = (M_{\text{ТТА}}, M_{\text{ИУПС}}, M_{\text{ИИПС}}, M_{\text{ИИ}}, S_{\text{св}}), \quad (1.1)$$

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

Информационная модель ТТА представляет объединение множества моделей объектов  $M_{\text{ТТА}} = \bigcup_{\eta} M_{\eta}^{\text{O}}$ , формализующих знания об объектах управления составляющих ТТА (см. рис. 1),  $\eta$  – номер объекта. Морфологически модель  $M_{\eta}^{\text{O}}$  можно представить в виде кортежа:

$$M_{\eta}^{\text{O}} = \langle NO, SF, RR, CU, K \rangle, \quad (1.2)$$

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

Режим работы  $RR \in \mathcal{RR}$ , где  $\mathcal{RR} = \{RR_{\eta} \mid \eta = \overline{1, n}\}$  представляет множество режимов работы  $\eta$ -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 следующую вид:  $\mathcal{CU} = \{En, Fl, Qp, Pr, Tm \dots\}$ , 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.

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

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

$$M_{\text{ИУПС}} = \{ \mathcal{I}\mathcal{E}^Y, \mathcal{A}^Y, \mathcal{P}\mathcal{M}^Y, \mathcal{I}\mathcal{S}^Y, \mathcal{K}\mathcal{R}^Y, \mathcal{O}\mathcal{E}\mathcal{R}^Y, \mathcal{S}^Y \} \quad (1.3)$$

и

$$M_{\text{ИИПС}} = \{ \mathcal{I}\mathcal{E}^I, \mathcal{A}^I, \mathcal{P}\mathcal{M}^I, \mathcal{I}\mathcal{S}^I, \mathcal{K}\mathcal{R}^I, \mathcal{O}\mathcal{E}\mathcal{R}^I, \mathcal{P}\mathcal{O}\mathcal{G}^I, \mathcal{S}^I \} \quad (1.4)$$

соответственно. Они содержат следующие множества:

– информационных элементов

$$\mathcal{I}\mathcal{E}^Y = \left\{ IE_{ji}^Y \mid j = \overline{1, d^Y}; i = \overline{1, n_\mu^Y} \right\}, \quad (1.5)$$

$$\mathcal{I}\mathcal{E}^I = \left\{ IE_{ji}^I \mid j = \overline{1, d^I}; i = \overline{1, n_\mu^I} \right\}, \quad (1.6)$$

здесь  $IE_{ji}^Y, IE_{ji}^I$  –  $j$ -й информационный элемент  $i$ -го алгоритма;  $d^Y, d^I$  – количество информационных элементов соответствующей подсистемы;

– алгоритмов

$$\mathcal{A}^Y = \left\{ A_{i\mu}^Y \mid i = \overline{1, n_\mu^Y}; \mu = \overline{1, n^Y} \right\} \quad (1.7)$$

и

$$\mathcal{A}^I = \left\{ A_{i\mu}^I \mid i = \overline{1, n_\mu^I}; \mu = \overline{1, n^I} \right\}, \quad (1.8)$$

здесь  $A_{i\mu}^Y, A_{i\mu}^I$  –  $i$ -й алгоритм соответствующей подсистемы;  $n_\mu^Y, n_\mu^I$  – количество алгоритмов в  $\mu$ -м модуле соответствующей подсистемы,  $n^Y, n^I$  – количество используемых функциональных программных модулей;

– функциональных программных модулей

$$\mathcal{P}\mathcal{M}^Y = \left\{ PM_\mu^Y \mid \mu = \overline{1, n^Y} \right\} \quad (1.9)$$

и

$$\mathcal{P}\mathcal{M}^I = \left\{ PM_\mu^I \mid \mu = \overline{1, n^I} \right\} \quad (1.10)$$

каждой подсистемы соответственно, например [1];

– множества технических средств

$$\mathcal{S}^Y = \left\{ TS_t^Y \mid t = \overline{1, n_{TC}^Y} \right\} \quad (1.11)$$

и

$$\mathcal{S}^I = \left\{ TS_i^I \mid i = \overline{1, n_{TC}^I} \right\}, \quad (1.12)$$

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;

$$\mathcal{KR}^Y = \left\{ KR_i^Y \mid i = \overline{1, k^Y} \right\}, \quad \mathcal{KR}^I = \left\{ KR_i^I \mid i = \overline{1, k^I} \right\}, \quad (1.13)$$

и

$$\begin{aligned} \mathcal{OGR}^Y &= \left\{ OGR_i^Y \mid i = \overline{1, o^Y} \right\}, \quad \mathcal{OGR}^I = \left\{ OGR_i^I \mid i = \overline{1, o^I} \right\}, \\ \mathcal{POG}^I &= \left\{ POG_i^I \mid i = \overline{1, o^I} \right\}. \end{aligned} \quad (1.14)$$

– множества матриц смежности синтезируемой подсистемы

$$\mathcal{S}^Y = \left\{ s_i^Y \mid i = \overline{1, \gamma^Y} \right\}, \quad \mathcal{S}^I = \left\{ s_i^I \mid i = \overline{1, \gamma^I} \right\}, \quad (1.15)$$

где  $\gamma^Y, \gamma^I$  – количество различных вариантов ИУПС и ИИПС.

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

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



Модель

$$M_{ИИ} = \{DS, Pol, IS\} \quad (1.16)$$

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

Множество  $IS = \langle \mathcal{IC}, Po \rangle$  содержит техническое и соответствующее программное обеспечение. Множество программного обеспечения  $Po = P_{sis} \cup P_{in} \cup P_{pr}$  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  $k$ -й задачи с  $j$ -й категорией доступа с  $i$ -м инструментальным программным средством.

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

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

Модели представления данных и знаний для информационно-измерительной и информационно-управляющей подсистем различны, поэтому возникает необходимость создавать базы данных и знаний соответственно для каждой подсистемы. Это дает возможность работы

измерительной подсистемы автономно и независимо от управляющей, что повышает ее мобильность, а также позволяет выполнять функции мониторинга параметров управляемого процесса.

Эффективность функционирования ИИУС ТТА в основном зависит от возможности:

- оперативно получать обоснованное решение об управлении 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 удобства эксплуатации системы в целом.

Повышение эффективности достигается решением следующих задач:

- проведение анализа 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 состояниях функционирования, о стратегиях, алгоритмах и параметрах управления;
- разработка процедур выработки решений в автоматическом режиме с учетом достоверности используемых свидетельств в условиях неопределенности и многомерного пространства.

Проектируемая ИИУС ТТА должна удовлетворять следующим критериям.

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. Помехоустой-

чивость. Снижение влияния действующих по каналам измерения и управления дестабилизирующих факторов при синтезе управляющего воздействия для достижения качества управления.

3. Модульность. Проектирование системы на базе современных открытых стандартов и спецификаций на измерительном и управляющем оборудовании. Создание типовых модулей системы, инвариантных к объектам управления. Возможности модернизации путем установки требуемых модулей и замены прикладного 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. Постоянное развитие – расширение функциональных возможностей, улучшение оперативности ИИУС ТТА.

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

9. Отказоустойчивость. Способность системы скрывать от пользователей отказ отдельных ее элементов, т.е. отказ одного из элементов может приводить к некоторому снижению качества ее работы, а не к полному останову.

Техническая эффективность работы ИИУС ТТА во многом зависит от возможностей и параметров, используемых для ее реализации аппаратных средств. При их выборе, в первую очередь, необходимо учитывать следующие аспекты.

1. Быстродействие. При достаточном запасе по быстродействию система будет работать надежно, при недостатке процессорного времени для расчета параметров ОУ система перейдет в нестабильный режим, возможны частые сбои в работе, управление происходит с задержкой и неактуально в текущий момент времени.

2. Помехозащищенность. Производства, в которых эксплуатируются ТТА, характеризуются значительными электромагнитными полями от мощных силовых цепей, высоковольтными электростатическими потенциалами, сильными искажениями напряжения при включении и выключении мощного технологического оборудования. Помехозащищенность зависит от качества созданной защиты от помех по входным цепям и питающей электросети и обеспечивается гальва-

нической развязкой, соответствующими фильтрами в устройстве связи с объектом, блоком питания, схемами бесперебойного питания и др.

3. Работоспособность микропроцессорного устройства при перепадах напряжения в питающей электросети. При снижении напряжения или отключении питания в этих устройствах не должно возникать необратимых искажений информации. Появление таких искажений равнозначно отказу промышленного контроллера, работоспособность которого обеспечивается рядом мероприятий: защитой от пропадания питания элементов памяти, созданием бесперебойной системы питания всего устройства.

4. Надежность элементной базы и схемных решений, использование резервирования. При выходе из строя какого-либо элемента необходимо осуществлять переключение объекта на традиционное управление.

5. Наличие самодиагностики и возможность быстрого определения и локализации неисправности.

Информационная эффективность работы ИИУС ТТА во многом определяется моделью представления данных. Для ее обеспечения выбрана реляционная модель. Преимущество реляционной модели заключается в способе хранения данных, который минимизирует их дублирование и исключает определенные типы ошибок обработки, возникающие при других способах хранения данных.

Для представления семантики предметной области в настоящее время принято использовать ER-модель, или модель «сущность-связь», созданную Ченом в 1976 году. Она стала фактически стандартом информационного моделирования баз данных. Большинство CASE-средств содержит инструментальные средства для описания данных в нотации этой модели. Кроме того, разработаны методы автоматического преобразования проекта БД из ER-модели в реляционную, при этом преобразование выполняется в даталогическую модель, соответствующую конкретной СУБД.

В основе ER-модели лежат следующие базовые понятия: сущность, с помощью которой моделируется класс однотипных объектов. При этом предполагается, что в системе существует множество экземпляров данной сущности. Объект, которому соответствует понятие сущности, имеет свой набор атрибутов-характеристик, определяющих свойства данного представителя класса. Набор атрибутов, однозначно идентифицирующий конкретный экземпляр сущности, называют ключевым.

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

## **1.5. 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. Использованию 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, представлена в работах А. С. Шаталова, Н. Т. Кузовкина, А. М. Сучилина и др. Вторая форма (графная) не получила такого широкого применения, хотя успешно использовалась в структурных исследованиях И. И. Гальперина и др. В работе Т. М. Райцына рассматривается возможность использования направленных графов для решения задач синтеза линейных систем автоматического управления [2]. Однако в перечисленных работах не приводятся решения задач управления тепло-технологическими процессами ТТА.

Для решения этой проблемы предлагается метод (описанный в работе исполнителей проекта [3]) 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 [4].

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 [4, 5].

Технология метода отражает представление множества задач алгоритмизации синтеза управления ТТА в пространстве состояний [6]. В пространстве состояний вершины графа соответствуют состояниям решения задач и представляют собой фреймы знаний [7], 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) [3, 7].

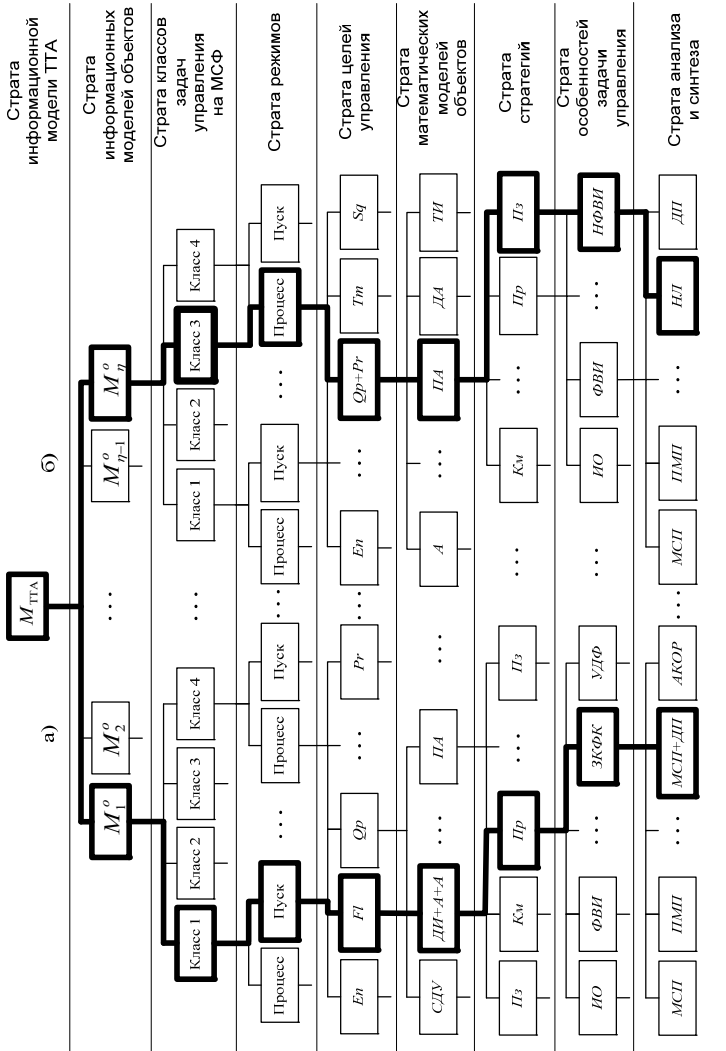
Граф содержит страту целей, определяемых режимами работы объектов, составляющих ТТА. Цели соответствуют минимизируемым функционалам, которые в свою очередь определяют решаемую задачу. Поиск в пространстве состояний характеризует решение конкретной задачи как процесс нахождения пути на графе, являющегося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

Интегрированный граф технологии (рис. 1.2) 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 [3].

При функционировании исследовательского прототипа ИИУС ТТА передача информации между пользователями, базами данных активными процедурами осуществляется посредством диалогов интеллектуального интерфейса, имеющего в своем составе экспертную систему «Энергосберегающее управление динамическими объектами» [8].

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  $M_n^o$ , хранимой в базе данных [7].

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.



**Рис. 1.2. Интегрированный граф метода алгоритмизации синтеза управляющих воздействий режимами ТТА:**  
*a* – синтез решения для режима «Пуск»; *б* – синтез решения для режима «Процесс»»

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 [9, 3, 7].

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 ТГА 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 раздел 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 (аперiodическое звено), ДА – двойного аперiodического 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..

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

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.

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.

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

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 [3].

Буквами а) и б) на рис.1.2. показаны примеры путей синтеза решения задачи управления, используемые при построении рабочего прототипа ИИУС СВЛ.

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. 1.2) с полным наполнением страт.

На исследовательской стадии происходит анализ состава ТТА, в результате чего формируется новый интегрированный граф техноло-

гии интеллектуализации синтеза решения задачи управления ТТА путем наполнения его страт баз данных и знаний знаниями об исследуемых объектах, составляющих ТТА (например, рис. 1.2, *a*) 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 [1].

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. Примеры реализации алгоритмизации синтеза управляющих воздействий приводятся в последующих разделах.

## 2. ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИИУС ТТА

---

Интеллектуальная информационно-управляющая система (ИИУС) – совокупность технических, программных и информационных средств, обеспечивающая решение задач анализа и синтеза управления режимами тепло-технологических аппаратов (ТТА) в реальном масштабе времени без участия лица, принимающего решение. Важным этапом при проектировании ИИУС ТТА являются постановки задач, решаемых системой.

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.

### 2.1. СТРУКТУРНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ИИУС ТТА

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: состав функциональных модулей программного обеспечения; содержание межмодульного интерфейса; техническое обеспечение; а также архитектура ИИУС ТТА, которая формализуется функциональной схемой, учитывающей заданные технико-экономические характеристики функционирования создаваемой системы [7].

Задача структурного построения проектных решений формулируется следующим образом [7]: следует найти оптимальное проектное решение архитектуры ИИУС ТТА

$$\gamma^* = \arg \min \{S(\gamma) \mid \gamma \in \Gamma\}, \quad (2.1)$$

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

$$S(\gamma) = \min(S^{\text{фпм}} + S^{\text{со}} + S^{\text{БД}} + S^{\text{БЗ}} + S^{\text{ДС}} + S^{\text{ГС}} + S^{\text{Рб}} + S^{\text{э}}), \quad (2.2)$$

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

Информационные модели вариантов архитектуры включают следующие блоки критериев и ограничений [7].

Для формализации поставленной задачи введем следующие переменные [4]:

$$x_{i,\mu}^y = \begin{cases} 1, A_{i\mu}^y \in PM_{\mu}^y; \\ 0, A_{i\mu}^y \notin PM_{\mu}^y; \end{cases} \quad x_{i,\mu}^I = \begin{cases} 1, A_{i\mu}^I \in PM_{\mu}^I; \\ 0, A_{i\mu}^I \notin PM_{\mu}^I; \end{cases} \quad (2.3)$$

$x_{i,\mu}^y$ ,  $x_{i,\mu}^I$  – массивы принадлежности  $i$ -го алгоритма  $\mu$ -му модулю соответствующих подсистем;

$$y_{j,i}^y = \begin{cases} 1, IE_{j,i}^y \in A_{i\mu}^y; \\ 0, IE_{j,i}^y \notin A_{i\mu}^y; \end{cases} \quad y_{j,i}^I = \begin{cases} 1, IE_{j,i}^I \in A_{i\mu}^I; \\ 0, IE_{j,i}^I \notin A_{i\mu}^I; \end{cases} \quad (2.4)$$

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

$$z_{\mu,j}^y = \begin{cases} 1, \sum_i^{n_m^y} x_{i\mu}^y y_{j,i}^y \geq 1; \\ 0, 0 < \sum_i^{n_m^y} x_{i\mu}^y y_{j,i}^y < 1; \end{cases} \quad z_{\mu,j}^I = \begin{cases} 1, \sum_i^{n_m^I} x_{i\mu}^I y_{j,i}^I \geq 1; \\ 0, 0 < \sum_i^{n_m^I} x_{i\mu}^I y_{j,i}^I < 1; \end{cases} \quad (2.5)$$

$z_{\mu,j}^y$ ,  $z_{\mu,j}^I$  – 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  $V_i^{\text{оп}}$  и постоянной памяти  $V_i^{\text{пм}}$  при работе  $i$ -го алгоритма был минимальным [7, 5]

$$V = \sum_i^{n_\mu^Y + n_\mu^I} V_i^{\text{п}} = \sum_i^{n_\mu^Y + n_\mu^I} (V_i^{\text{пм}} + V_i^{\text{оп}}) \rightarrow \min, \quad (2.6)$$

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:

$$\sum_{i=1}^{n_\mu^Y} x_{i,\mu}^Y \leq N_\mu^Y \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^{n_\mu^I} x_{i,\mu}^I \leq N_\mu^I, \quad (2.7)$$

где  $N_\mu^Y$ ,  $N_\mu^I$  – максимально допустимое количество алгоритмов в модулях, определяется согласно подмножествам  $\mathcal{H}_B$  наиболее вероятных и  $\mathcal{H}_K$  критических состояний функционирования конкретного ТТА;

– на однократность включения алгоритма в программные модули:

$$\sum_{\mu=1}^{n^Y} x_{i,\mu}^Y = 1 \quad \text{и} \quad \sum_{\mu=1}^{n^I} x_{i,\mu}^I = 1; \quad (2.8)$$

– на дублирование занимаемой памяти информационными элементами в различных алгоритмах:

$$\sum_{i=1}^{n_\mu^Y} y_{ji}^Y = 1; \quad (2.9)$$

– на сложность информационного интерфейса между отдельными модулями:

$$\sum_j^{d^Y} \sum_{\mu=1}^{n^Y-1} \sum_{\mu'=\mu+1}^{n^Y} z_{\mu\mu'}^Y z_{\mu'j}^Y \leq D^Y, \quad \sum_j^{d^I} \sum_{\mu=1}^{n^I-1} \sum_{\mu'=\mu+1}^{n^I} z_{\mu\mu'}^I z_{\mu'j}^I \leq D^I, \quad (2.10)$$

где  $D^Y$ ,  $D^I$  – максимально допустимые интерфейсы между модулями подсистем (допустимое число переменных, являющихся общими для модулей).

При подборе технических средств минимизируются суммарные критерии:

$$\sum_{ts}^{n_{TC}^Y} q_{ts}^Y = \sum_{ts}^{n_{TC}^Y} \frac{S_{ts}^{TC}}{P_{ts}^{TC}} \rightarrow \min \quad \text{и} \quad \sum_{ts}^{n_{TC}^I} q_{ts}^I = \sum_{ts}^{n_{TC}^I} \frac{S_{ts}^{TC}}{P_{ts}^{TC}} \rightarrow \min, \quad (2.11)$$

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

Критерий минимизации сложности системы может быть записан в следующем виде:

$$\dim S_{cb} = \sum_i \sum_j s_{ij}, \quad \dim S_{cb} \rightarrow \min. \quad (2.12)$$

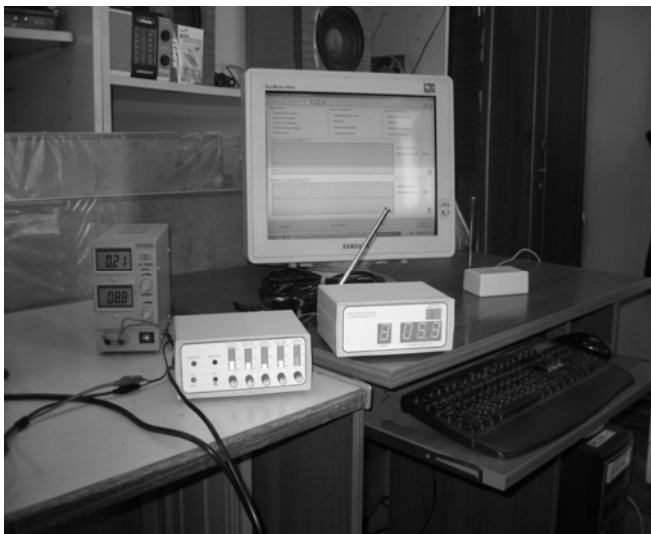
Также минимизируется критерий количества технических средств обеих подсистем

$$n_{TC}^Y + n_{TC}^I \rightarrow \min. \quad (2.13)$$

Решение задач структурного синтеза осуществлено 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. 1.2), 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 [7].

Возможности практического решения задач структурного построения приводятся в теории сложности задач выбора, где показано, что задачи даже умеренного размера относятся к классу NP-полных, которые удается решать только приближенно [11]. Поэтому большинство практических задач структурного построения решают с помощью приближенных (эвристических) методов. Эти методы не гарантируют оптимального решения, но приводят к результатам, близким к оптимальным, при приемлемых затратах вычислительных ресурсов.



**Рис. 2.1. Реализация индивидуального датчика влажности в конкретном образце**

Рассмотрим структурное построение программного обеспечения на примере небольшой информационно-измерительной системы – интеллектуальный датчик влажности (ИДВ), аппаратная реализация, которого представлена на рис. 2.1. ИДВ позволяет проводить косвенные измерения влажности материала непосредственно в процессе сушки в реальном времени [22]. 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 [12].

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).

Для реализации работы ИДВ используется 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. 2.1) и граф взаимодействия алгоритмов посредством информационных элементов (см. рис. 2.2). В таблице 2.1 приведены различные варианты распределения алгоритмов по модулям. Например, алгоритм предварительного расчета входных значений может размещаться в следующих модулях: ИИ, СВ, МОД, МРИП.

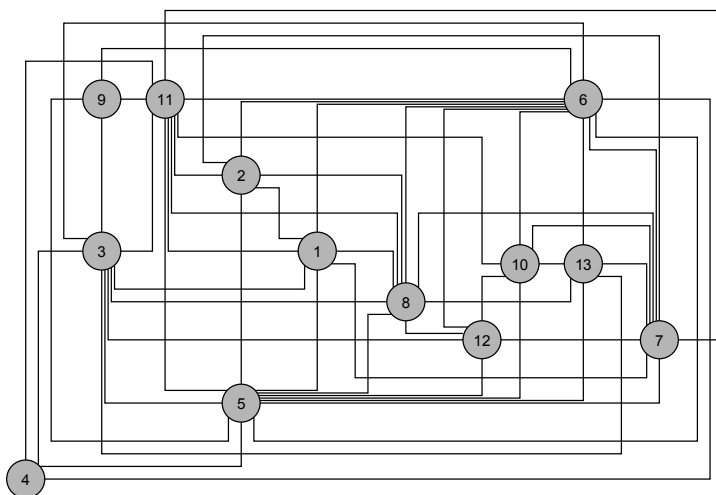
Постановку задачи можно сформулировать следующим образом: задаются в качестве исходных данных таблица вариантов распределения алгоритмов по модулям (табл. 2.1) и графа взаимодействия алгоритмов посредством информационных элементов (рис. 2.2), вводятся ограничения на однократность включения алгоритма в программные модули, на дублирование занимаемой памяти информационными элементами, на сложность информационного интерфейса между отдельными модулями, формируется целевая функция. Требуется определить с использованием генетического алгоритма оптимальное размещение алгоритмов по модулям.

### 2.1. 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



Номер алгоритма	Наименование алгоритма	Наименование модуля
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



**Рис. 2.2. Граф взаимодействия алгоритмов посредством информационных элементов**

Решение задачи предлагается проводить по предложенной в [13] методике, состоящей из следующих этапов.

1. Формируется вектор-строка  $P$  генов распределения алгоритмов по модулям.

2. Описывается матрица  $D$  связей взаимодействия алгоритмов посредством информационных элементов.

3. Создается 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

$$\sum_{j=1}^m x_{i,j} = 1,$$

– на дублирование занимаемой памяти  $k$ -м информационным элементом

$$\sum_{l=1}^n y_{kl} = 1,$$

– на сложность информационного интерфейса между отдельными модулями

$$\sum_{k=1}^d \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{j'=j+1}^m z_{kj} z_{kj'} \leq M,$$

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 в целях 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  $l$ -й области памяти,  $z_{k,j}$  – вхождение  $k$ -го информационного элемента в  $j$ -й 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 алго-

ритма. Целевая функция является суммой элементов главной диагонали матрицы  $W$  и подлежит максимизации посредством изменения значений генов вектора  $P$  с помощью генетических алгоритмов.

Согласно приведенной методике сформируем вектор-строку  $P$  (рис. 2.3), число ее элементов соответствует числу распределяемых алгоритмов ( $n = 13$ ). Здесь не изменяемые в результате действия ограничений ячейки с  $i = 3, 5, 6, 7, 8, 9$ .

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. 2.2). Она имеет размер  $n \times m$ . Если  $i$ -й алгоритм содержится в  $j$ -м 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.

$i$	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

**Рис. 2.3. Вектор-строка  $P$**

## 2.2. 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	

Заполним матрицу  $D$  ( $n \times n$ ), 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  $D$

$$Y = X \times D .$$

Матрица  $W$  представляет собой произведение матриц  $Y$  и  $X^T$

$$W = Y \times X^T .$$

### 2.3. 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

Целевая функция  $f$  является суммой элементов главной диагонали матрицы  $W$  и подлежит максимизации посредством 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.

Требуется найти: максимум функции  $f$ .

Для решения поставленной задачи используются следующие ограничения:

- ограничение диапазона для хромосом

$$1 \leq P_i \leq 6, \quad i = \overline{1,13};$$

- ограничение на единственность алгоритмов

$$\sum_{i=1}^6 X_i = 1, \quad i = \overline{1,13};$$

– ограничения размещения для конкретных алгоритмов (из условия):

$$\begin{aligned} 1 \leq P_1 \leq 4, \quad 1 \leq P_4 \leq 4, \quad 2 \leq P_{10} \leq 3, \\ 2 \leq P_{11} \leq 3, \quad 1 \leq P_{12} \leq 5, \quad 4 \leq P_{13} \leq 5. \end{aligned}$$

Решение задачи распределения алгоритмов по функциональным программным модулям в результате оптимизации с использованием генетического алгоритма приведено в табл. 2.4.

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.

#### 2.4. Результат распределения алгоритмов по модулям

Номер алгоритма	Наименование алгоритма	Наименование модуля
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

#### 2.2. ЭНЕРГО- ИЛИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ С УЧЕТОМ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ И СМЕНЫ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

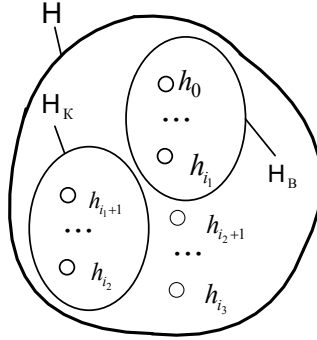
Модели объектов в ИИУС ТТА представляются на МСФ [9, 10]. Важным на этапе анализа предметной области является определение  $\mathcal{H} = \mathcal{H}^{\text{PP}} \times \mathcal{H}^{\text{P}}$  – множества состояний функционирования ТТА. Множество состояний функционирования дает возможность при описании

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:  $H_i^{PM}$ ,  $i = \overline{1, n}$  – внутренние, связанные с изменением вида и параметров моделей, и внешние, косвенно влияющие на управляющие воздействия:  $H^{KF}$  – изменения качества топливной смеси, давление пара, напряжения и частоты питающей сети т.п.,  $H^{OC}$  – изменения окружающей среды (температура, влажность, давление и т.д.). Таким образом, множество состояний функционирования режимов работы ТТА можно записать в виде

$$\mathcal{H}^{PP} = H_1^{PM} \times \dots \times H_n^{PM} \times H^{KF} \times H^{OC}.$$

Множество состояний работоспособности  $\{\mathcal{H}_{вер}, \mathcal{H}_{кр}\} \subset \mathcal{H}^P$  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  $h = \langle h^{PP}, h^P \rangle$ , где  $h^{PP} \in \mathcal{H}^{PP}$ ,  $h^P \in \mathcal{H}^P$ . 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  $h \in \mathcal{H}_{кр}$ .

Итак, математическая модель функционирования ТТА на МСФ в режиме «Пуск» представляет собой множество моделей  $\mathcal{M}_h = \{M_{ih^P}, i = \overline{1, n}, h^P \in \mathcal{H}\}$ , где  $h \in \mathcal{H}$  и  $M_{ih^P}$  – есть модель динамики  $i$ -го объекта ТТА в состоянии  $h^P$ , вид которой зависит от значения  $H_i^{PM}$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Получаемое на этапе анализа ТТА множество моделей  $\mathcal{M}_h$  сохраняется в базе данных ИИУС ТТА [9, 10] (рис. 2.4).



**Рис. 2.4. Множество состояний функционирования ТТА**

Постановки задач энерго- или ресурсосберегающего управления 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  $M_h$ :

$$\dot{z} = f_1(A, B, z, u, h, t), \quad (2.14)$$

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  $J$ :

$$z(t_{0h}) = z_h^0 \rightarrow z(t_{kh}) = z_h^k, \quad (2.15)$$

$$\forall t \in [t_{0h}, t_{kh}]: u(t/h) \in [u_{nh}, u_{vh}], \quad (2.16)$$

$$J = \int_{t_{0h}}^{t_{kh}} g(t, z(t/h), u(t/h)) dt \rightarrow \min_u, \quad (2.17)$$

где  $z_h^0$  и  $z_h^k$  – начальное и конечное состояния фазового вектора;  $u_{nh}, u_{vh}$  – границы управления;  $t_{0h}, t_{kh}$  – границы временного интервала;



– массив реквизитов

$$\mathfrak{R} = \{ A, B, z_{0h}, z_{kh}, u_{nh}, u_{vh}, t_{0h}, t_{kh}, h \} .$$

Систему, задаваемую моделью (2.14) для текущего состояния функционирования  $h$ , необходимо перевести за фиксированный интервал времени из исходного состояния  $z_{0h}$  в конечное состояние  $z_{kh}$  при имеющемся ограничении (2.16) на управляющее воздействие при этом, минимизируя функционал (17) [3].

Найти решение задачи (2.14) – (2.17) – это значит, для заданного массива  $\mathfrak{R}$  исходных данных найти вид функции управления  $u^*(t/h)$ ,  $t \in [t_0, t_k]$ , вычислить параметры этой функции, рассчитать оптимальную траекторию изменения фазовых координат  $z^*(t/h)$ , а также минимизировать функционал  $J$ , в качестве которого, в зависимости от управляемого процесса, выбирают функционал «расход топлива»:

$$J_T = \int_{t_{0h}}^{t_{kh}} |u(t/h)| dt \rightarrow \min_u$$

или функционал «затраты энергии»:

$$J_\mathcal{E} = \int_{t_{0h}}^{t_{kh}} u^2(t/h) dt \rightarrow \min_u$$

(см. работы руководителя проекта [3, 14]).

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.

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

$$M_{hj} : z_{i+1} = Fz_i + Gu_i, \quad y_i = Qz_i + \hbar v_i, \quad u_i = L_i(R_{jh})y_i + \wp w_i, \\ i = \overline{0, N-1}, \quad R_{jh} \in \mathcal{R}_j. \quad (2.18)$$

Требуется перевести объект за фиксированное количество шагов  $N$  из исходного состояния в конечную область  $\chi$

$$z_0 = z^0, z_N \in \chi = [z_{\text{н}}^{\text{к}}; z_{\text{в}}^{\text{к}}], \quad (2.19)$$

при ограничении на управляющее воздействие на каждом шаге

$$\forall i \in [0, N-1], u_i \in [u_{\text{н}}, u_{\text{в}}], \quad (2.20)$$

с минимумом функционала в зависимости от объекта управления

$$J = \delta t \sum_{i=0}^{N-1} g(t, z(t/h), u(t/h)) \rightarrow \min_u. \quad (2.21)$$

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  $\sigma_w$  и  $\sigma_v$  соответственно,  $F, G, Q$  – параметры модели динамики объекта;  $L_i(R_{jh})$  – оператор синтеза управляющего воздействия,  $g$  – функция управляющего воздействия,  $u_{\text{н}}, u_{\text{в}}$  – границы интервала принадлежности функции  $g$ ,  $z^0$  – начальное значение вектора фазовых координат,  $\chi = [z_{\text{н}}^{\text{к}}; z_{\text{в}}^{\text{к}}]$  – конечная область, в которую необходимо перевести систему;  $N$  – число шагов на временном интервале управления  $[t_0; t_k]$ ,  $\delta t$  – шаг дискретизации времени. Множество массивов исходных данных (реквизитов) для численного решения задачи (2.18) – (2.21) имеет вид

$$R = \left\{ R_{jh} \left( F, G, Q, u_{\text{н}}, u_{\text{в}}, z^0, z_{\text{н}}^{\text{к}}, z_{\text{в}}^{\text{к}}, t_0, t_k, \delta t, \sigma_w, \sigma_v \right)_h \right\}, \quad j = 1, 2, 3. \quad (2.22)$$

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

$$K = \langle M_h, F, C, O \rangle,$$

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.

### **2.3. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ «ПРОЦЕСС» НА ПРИМЕРЕ ВАЛЬЦЕЛЕНТОЧНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

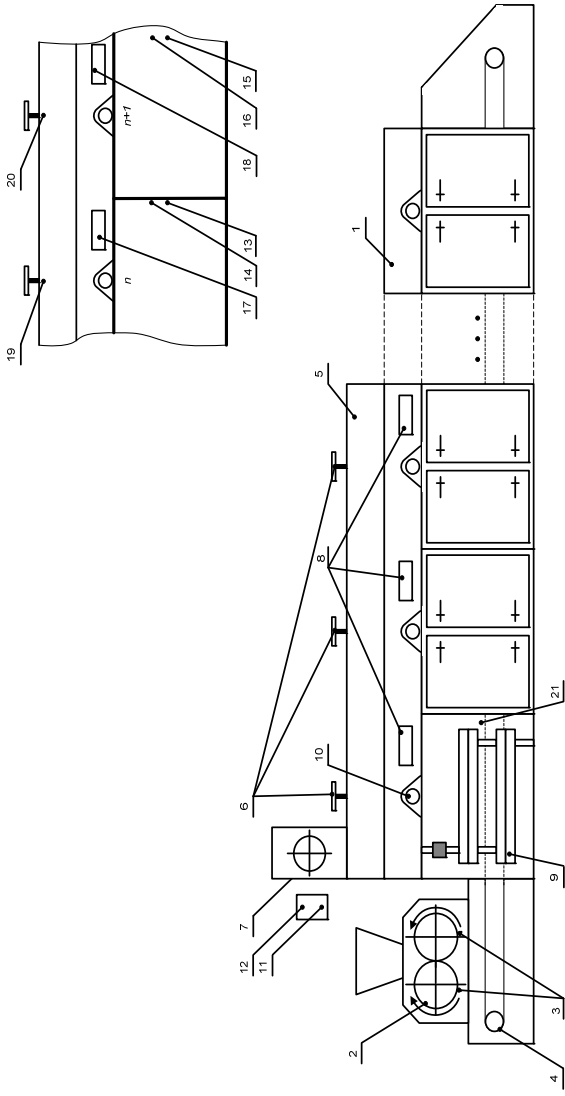
Задачи управления процессами сушки, как задачи управления объектами с распределенными параметрами, рассмотрим применительно к СВЛ, которые представляют собой коридор, разделенный на секции (зоны) (рис. 2.5), в котором размещены продуктовые пластинчатый и скребковый транспортеры. Пастообразный материал и сушильный агент (сушильным агентом является нагретый воздух) движутся в коридоре противоточно, в каждой секции обеспечивается перекрестный ток за счет рециркуляционных вентиляторов, а также подогрев сушильного агента в паровых калориферах. Формовочные вальцы отвечают за измельчение материала, подаваемого на продуктовый транспортер, а также, в некоторых модификациях сушилок, за его первоначальный подогрев. 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). При помощи воздухозаборных окон регулируется приток сушильного агента в секции СВЛ, а сбросные шиберы и вытяжной вентилятор отвечают за отвод отработанного сушильного агента [15].

Исследуемые сушилки могут иметь различное количество секций от четырех до восьми, но спроектированы они таким образом, что характерные участки кинетической кривой процесса сушки соответствуют отдельным секциям. Каждая секция может иметь свои конструктивные особенности и работать самостоятельно при любом заданном гидродинамическом и температурном режимах [16].

СВЛ, как объекты управления, представляют собой многомерные системы с распределенными параметрами [17, 18], которые обладают следующими особенностями: необходимость регулирования влажности материала по косвенным параметрам, наличие нескольких независимых управляющих воздействий, сложность критерия оптимальности, который должен обеспечивать требуемое качество конечного продукта и производительность сушильной установки.

Процесс сушки является определяющим для обеспечения качества конечного продукта. Различают три основных периода этого процесса [16]:

- 1) период разогрева материала,
- 2) период постоянной скорости процесса сушки,
- 3) период падающей скорости процесса сушки.



**Рис. 2.5. Вальцеленточная сушильная установка (СВЛ):**

1 – корпус; 2 – вальцевая система; 3 – ножевой механизм; 4 – пластинчатый конвейер (лента); 5 – система отвода сушильного агента; 6 – шиберная система для удаления сушильного агента из каждой камеры; 7 – вытяжной вентилятор; 8 – воздухозаборные окна для обеспечения притока свежего сушильного агента; 9 – calorifiers; 10 – рециркуляционные вентиляторы; 11 – датчик начальной температуры сушильного агента; 12 – датчик начальной влажности сушильного агента; 13, 14 – датчики соответственно температуры и влажности сушильного агента в  $n$ -й камере; 15, 16 – датчики соответственно температуры и влажности сушильного агента в  $n + 1$ -й камере; 17, 18 – датчики степени открытия воздухозаборных окон в  $n$ -й и  $n + 1$ -й камере; 19, 20 – датчики степени открытия шиберов в  $n$ -й и  $n + 1$ -й камерах; 21 – датчик наличия ворошителя

В течение первого периода повышается температура материала, но его влагосодержание снижается незначительно. Этому периоду соответствует участок 1 кривой кинетики сушки материала, представленной на рис. 2.6, а.

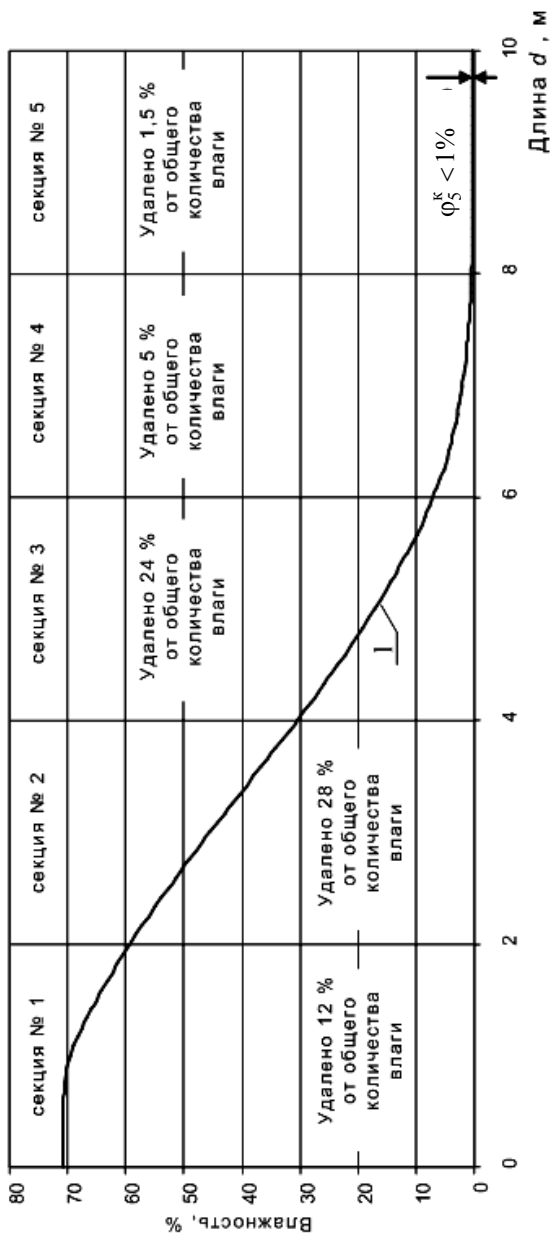
Во втором периоде (участок 2 кривой кинетики сушки) влага испаряется со всей поверхности материала так же, как она испаряется с зеркала испарения некоторого объема жидкости. В этом периоде скорость процесса сушки примерно постоянна и определяется лишь скоростью внешней диффузии, т.е. диффузии паров влаги с поверхности материала в окружающую среду [16].

В третьем периоде (участок 3 кривой кинетики сушки) скорость сушки определяется внутренней диффузией – перемещением влаги изнутри материала к его поверхности. С началом третьего периода поверхность подсохнувшего материала начинает покрываться коркой, и поверхность испарения влаги постоянно уменьшается, что приводит к увеличению сопротивления внутренней диффузии и к непрерывному уменьшению скорости процесса сушки. В зависимости от структуры и толщины слоя материала испарение влаги с его поверхности в конце третьего периода практически прекращается [16].

В периоде постоянной скорости процесса происходит удаление максимального количества влаги из материала. Назовем камеры, обеспечивающие постоянную скорость процесса сушки, лимитирующими, так как протекающий в них процесс во многом определяет качество конечного продукта, основным показателем которого является конечная абсолютная влажность  $\varphi_k^k$  материала. Например, пигмент рубиновый ВКС должен иметь конечное влагосодержание менее одного процента, т.е.  $\varphi_k^k < 1\%$  [15]. Лимитирующие камеры  $n$ -й и  $(n + 1)$ -й камеры являются самыми напряженными по влагосъему [19].

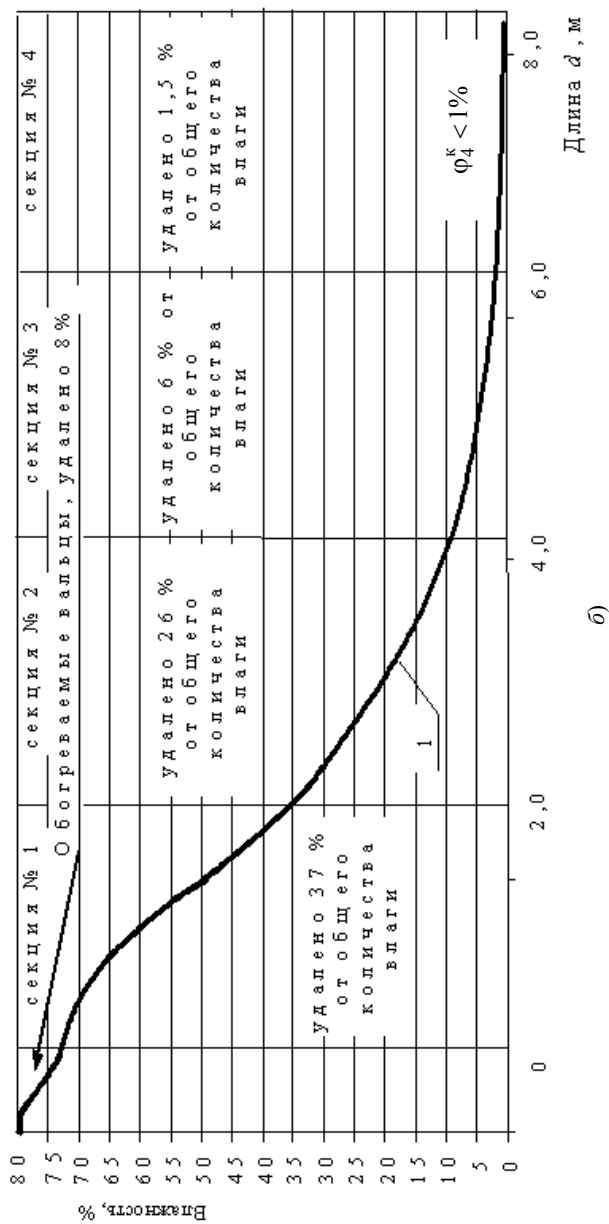
В лимитирующих камерах снимается основная или поверхностная влага. В этих камерах имеется воздухозаборное окно, обеспечивающее приток сушильного агента в камеру, подогрев воздуха осуществляется в паровом калорифере, отработанный воздух отводится через сбросной шибер вытяжным вентилятором, который работает в циклическом режиме. Для установки датчиков 12 – 20 (рис. 2.6) требуется определить номера лимитирующих камер, так как в различных вальцеленточных сушильных установках (СВЛ) напряженными по влагосъему могут оказаться камеры с разными порядковыми номерами [19].

Определяемые порядковые номера лимитирующих камер зависят от: конструктивных особенностей, настроек камер, наличия обогрева на вальцах, общего количества камер (секций) –  $k$  в СВЛ.



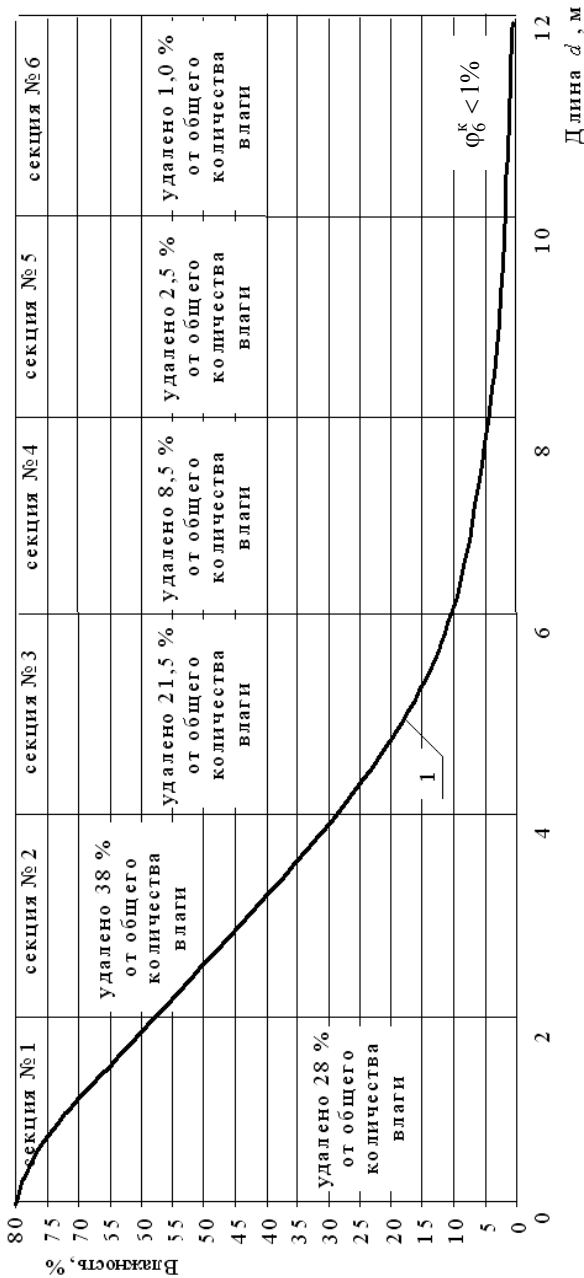
a)

**Рис. 2.6. Кинетика процесса сушки в СВЛ:**  
 а – пятисекционная СВЛ,  $k = 5$ ; б – четырехсекционная СВЛ,  $k = 4$ ; в – шестисекционная СВЛ,  $k = 6$ ;  
 / – кривая процесса сушки,  $\varphi_n$  – начальная влажность материала;  $d$  – длина СВЛ, м



б)

Рис. 2.6. Продолжение



е)

Рис. 2.6. Окончание



Определить камеры, в которых удаляется максимальное количество влаги, позволяют кинетические кривые. Так, например, в пятисекционных СВЛ с не обогреваемыми вальцами (рис. 2.6, *а*) в качестве первой лимитирующей камеры рассматривается камера номер два ( $n=2$ ), а второй лимитирующей камеры – номер три ( $n+1=3$ ). В четырехсекционных СВЛ с обогреваемыми вальцами (рис. 2.6, *б*) номера лимитирующих камер  $n=1$ , а  $n+1=2$ . Согласно приведенным кинетическим кривым *а*, *б* на рис. 2.6, в камерах  $n$  и  $n+1$  удаляется примерно 60...80% от начального количества влаги, содержащейся в загружаемом материале [19].

На влагосодержание конечного продукта  $\phi_k^k$  влияет большое число факторов, распределенных по длине аппарата. Основными из них являются: начальное влагосодержание материала, температура и влажность сушильного агента в секциях, положение воздухозаборных окон, шиберов и др. [209].

Достижение требуемого качества продукции в основном обеспечивается управлением режимами работы в сушильной установке. При этом, учитывая особенности объекта, можно выделить общую задачу управления процессом сушки и ряд частных задач [14].

В общем виде задачу управлением тепло-технологическим процессом формулируется следующим образом [14]. Задаются:

– оператор  $f$ , позволяющий определять значения компонентов вектора выходных переменных  $\vec{y} = (y_1, \dots, y_G)^T$  в зависимости от значений векторов управляющих воздействий  $\vec{u} = (u_1, \dots, u_D)^T$  и возмущающих воздействий  $\vec{x} = (x_1, \dots, x_P)^T$  при различных состояниях функционирования

$$H = \{h_l(\cdot), l = \overline{1, L}\}. \quad (2.23)$$

Оператор  $f$  условно запишем в виде

$$f: U \times X \times H \rightarrow Y, \quad (2.24)$$

где  $U, X, Y, H$  – множества значений управляющих, возмущающих воздействий, выходных переменных и изменений состояний функционирования соответственно;  $l$  – номер состояния функционирования;  $L$  – количество возможных состояний функционирования;  $G, D, P$  – размерности векторов  $\vec{y}$ ,  $\vec{u}$  и  $\vec{x}$  соответственно;

– ограничения на значения выходных переменных  $y$  и изменение управляющих воздействий  $u$ , т.е.

$$y_g \in Y_g^{\text{доп}}, \quad g = \overline{1, G}; \quad (2.25)$$

$$u_d \in U_d^{\text{доп}}, \quad d = \overline{1, D}, \quad (2.26)$$

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

– критерий оптимальности, характеризующий качество продукции и производительность работы объекта,

$$Q = Q(\Delta Qp, \Delta Pr, \vec{u}) \rightarrow \min_{\vec{u}}, \quad (2.27)$$

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

Требуется определить такие значения управляющих воздействий  $u_d^*$ , при которых выполняются ограничения (2.25), (2.26), и критерий (2.27) достигает минимального значения.

Компонентами вектора выхода  $y$  в задаче (2.23) – (2.27) являются влажность материала на выходе  $n$ -й,  $(n + 1)$ -й лимитирующих камер и  $\varphi_k^k$  – всей сушильной установки. На рисунке 2.7 приведена структура пятисекционной СВЛ как объекта управления. Векторы управляющих и возмущающих воздействий записываются в виде

$$u = (u_o^{\text{сл}}, u_n^{\text{взо}}, u_n^{\text{сш}}, u_{n+1}^{\text{взо}}, u_{n+1}^{\text{сш}}, u_o^{\text{вв}}); \quad (2.28)$$

$$x = (\varphi_n, \varphi_n^k, x_n^{\text{тса}}, x_n^{\text{вса}}, x_n^{\text{вор}}, x_{n+1}^{\text{тса}}, x_{n+1}^{\text{вса}}, x_o^{\text{тов}}, x_o^{\text{воб}}), \quad (2.29)$$

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 первой и второй лимитирующих секций соответственно;  $u_o^{\text{вв}}$  – управление работой вытяжного вентилятора;  $u_o^{\text{сл}}$  – управление скоростью движения ленты транспортера;  $x_n^{\text{тса}}, x_n^{\text{вса}}$  – температура и влажность сушильного агента в первой лимитирующей секции соответственно;  $x_n^{\text{вор}}$  – наличие или отсутствие ворошителя на входе первой лимитирующей секции;  $x_{n+1}^{\text{тса}}, x_{n+1}^{\text{вса}}$  – температура и влажность сушильного агента во второй лимитирующей секции соответственно;  $x_o^{\text{тов}}, x_o^{\text{воб}}$  – температура и влажность окружающего воздуха соответственно.

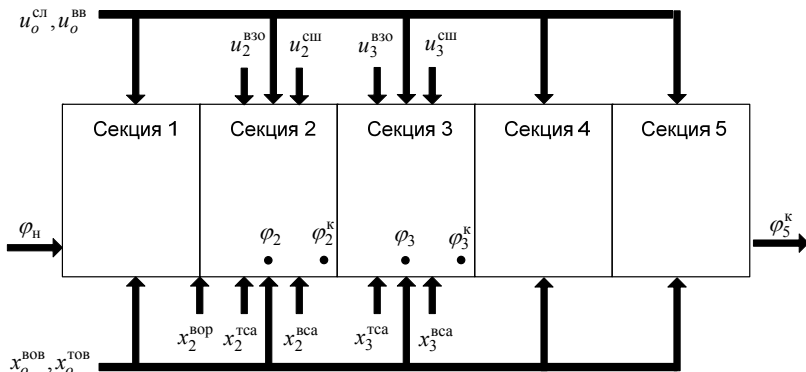


Рис. 2.7. Структура пятисекционной СВЛ как объекта управления

Основным компонентом вектора управляющих воздействий  $u$  является скорость движения ленты транспортера. В случае необходимости также могут использоваться воздухозаборные окна и сбросные шиберы соответствующих секций СВЛ.

Учитывая зависимость функции потерь производительности  $\Delta\text{Пр}$  от управления  $u$ , близкую к линейной, и зависимость функции потерь качества  $\Delta\text{К}$  от  $u$ , близкую к параболической, критерий  $Q$  может быть представлен в следующем виде:

$$Q = c_1(b_0 + b_1u^2) + c_2(a_0 + a_1u) \rightarrow \min_u, \quad (2.30)$$

где  $c_1, c_2$  – весовые коэффициенты;  $b_0, b_1$  – параметры функции потерь качества конечной продукции;  $a_0, a_1$  – параметры функции потерь производительности процесса [14].

Компонентами множества ситуаций  $\mathcal{H}$  являются возможные траектории  $h(\cdot)$  изменения влажности по длине аппарата, т.е.  $h(\cdot) = (\varphi_n, \varphi_{n+1}, \varphi_k^k)$ .

Частные задачи управления процессом сушки рассматриваются применительно к отдельным партиям материала, находящимся в лимитирующих камерах. Первая частная задача решается на основе информации, получаемой о качестве материала в центре  $n$ -й лимитирующей камеры и значений управляющих и возмущающих воздействий, а вторая частная задача на основе информации о качестве материала в центре  $n$ -й и  $(n + 1)$ -й лимитирующих камер с учетом значений управляющих и возмущающих воздействий [14].

Математически первая частная задача применительно к  $m$ -й партии материала может быть записана следующим образом. Задаются:

– модель определения влажности материала в первой лимитирующей камере сушильной установки

$$\varphi_n(t_n^m) = f(u_n, x_n, A_n), \quad (2.31)$$

где  $t_n^m$  – момент времени определения влажности  $m$ -й партии материала в  $n$ -й камере;  $A_n$  – массив параметров модели для определения влажности материала в центре  $n$ -й лимитирующей камеры; векторы управляющих  $u_n$  и возмущающих  $x_n$  воздействий содержат следующие компоненты:

$$u_n = (u_o^{cl}, u_n^{B3O}, u_n^{CII}, u_o^{BB}); \quad (2.32)$$

$$x_n = (\varphi_n, x_n^{Tca}, x_n^{Bca}, x_n^{BOP}, x_o^{TOB}, x_o^{BOB}), \quad (2.33)$$

– ограничения на изменение управляющих воздействий  $u_n$  и выходной переменной  $\varphi_n$ :

$$u_n \in U_n^{\text{доп}}; \quad (2.34)$$

$$\varphi_n \in Y_n^{\text{доп}}, \quad (2.35)$$

где  $U_n^{\text{доп}}$  – область допустимых значений управляющих воздействий  $n$ -й лимитирующей камеры;  $Y_n^{\text{доп}}$  – область допустимых значений влажности в  $n$ -й лимитирующей камере сушильной установки;

– минимизируемый функционал

$$Q_n = c_1 \Delta K(u_n) + c_2 \Delta \text{Пр}(u_n) \rightarrow \min_{u_n}. \quad (2.36)$$

При этом требуется при прохождении  $m$ -й партии материала в  $n$ -й лимитирующей камере, с помощью модели (3.30) определить влажность материала и, если она выходит за допустимые пределы (2.35), то выработать корректирующее воздействие

$$u_n^* = \arg \min_{u_n} Q_m(\Delta K, \Delta \text{Пр}, c_1, c_2, u_n), \quad (2.37)$$

при этом должно выполняться ограничение (2.35) и критерий (2.36) должен достигать минимального значения [14].

Для численного решения задачи задается массив реквизитов

$$R = (A_n, x_n(t_n^m), u_n(t_n^m), U_n^{\text{доп}}, Y_n^{\text{доп}}, c_1, c_2). \quad (2.38)$$

Аналогично формулируется вторая частная задача. Задаются:

– модель определения влажности материала в  $n$ -й и  $(n + 1)$ -й лимитирующих камерах сушильной установки

$$f_m(A_n, A_{n+1}, \varphi_n(t_n^m), \varphi_{n+1}(t_{n+1}^m), \varphi_k^k(t_k^m), u_n, u_{n+1}, x_n, x_{n+1}) = 0, \quad (2.39)$$

где  $t_{n+1}^m, t_k^m$  – моменты времени определения влажности  $m$ -й партии материала в  $(n + 1)$ -й лимитирующей и конечной камерах соответственно;  $A_{n+1}$  – массив параметров модели для расчета влажности в  $(n + 1)$ -й лимитирующей камере.

Векторы управляющих  $u_{n+1}$  и возмущающих  $x_{n+1}$  воздействий состоят из следующих компонентов:

$$u_{n+1} = (u_o^{\text{сл}}, u_{n+1}^{\text{взо}}, u_{n+1}^{\text{сш}}, u_o^{\text{вв}}); \quad (2.40)$$

$$x_{n+1} = (\varphi_n, x_{n+1}^{\text{тса}}, x_{n+1}^{\text{вса}}, x_o^{\text{тов}}, x_o^{\text{вов}}); \quad (2.41)$$

– ограничения на изменение управляющих воздействий  $u_n, u_{n+1}$  и значений  $\varphi_n, \varphi_{n+1}, \varphi_k^k$

$$u_n \in U_n^{\text{доп}}, u_{n+1} \in U_{n+1}^{\text{доп}}; \quad (2.42)$$

$$\varphi_n \in Y_n^{\text{доп}}, \varphi_{n+1} \in Y_{n+1}^{\text{доп}}, \varphi_k^k \in Y_k^{\text{доп}}, \quad (2.43)$$

где  $U_{n+1}^{\text{доп}}$  – область допустимых значений управляющих воздействий  $(n + 1)$ -й лимитирующей камеры;  $Y_{n+1}^{\text{доп}}, Y_k^{\text{доп}}$  – области допустимых значений влажности в  $(n + 1)$ -й лимитирующей камере и на выходе сушильной установки соответственно;

– минимизируемый функционал

$$Q_m(\Delta K, \Delta \text{Пр}, u_{n+1}) \rightarrow \min; \quad (2.44)$$

– множество изменений ситуаций в процессе эксплуатации сушильной установки

$$\mathcal{H} = \{h_l(\cdot), l = \overline{1, L}\}. \quad (2.45)$$

Требуется при прохождении  $m$ -й партии материала в очередной лимитирующей секции с помощью модели (2.39) определить влажность материала в  $n$ -й и  $(n + 1)$ -й лимитирующих камерах, а также на выходе сушильной установки, проверить выполнение ограничений (2.42) и (2.43) при необходимости выработать корректирующее воздействие

$$u_{n+1}^* = \arg \min_{u_{n+1}} Q_m(\Delta K, \Delta \text{Пр}, u_{n+1}), \quad (2.46)$$

при этом должно выполняться ограничение (2.42) и критерий (2.44) достигать минимального значения [15].

Для численного решения задачи задается массив реквизитов

$$R = (A_n, A_{n+1}, x_n(t_m), u_n(t_m), x_{n+1}(t_m), u_{n+1}(t_m), U_n^{\text{доп}}, U_{n+1}^{\text{доп}}, Y_n^{\text{доп}}, Y_{n+1}^{\text{доп}}, Y_k^{\text{доп}}, \mathcal{H}). \quad (2.47)$$

Как видно из сформулированных задач управления режимами сушки, для их решения необходимо использование моделей определения влажности материала в центральных частях и на выходе  $n$ -й и  $(n + 1)$ -й камер, а также на выходе последней  $k$ -й камеры сушильной установки [14].

### **3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ И ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИМИ СИСТЕМАМИ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

---

Модели, используемые в интеллектуальных информационно-управляющих системах тепло-технологических аппаратов (ИИУС ТТА), должны быть пригодными для интеллектуального синтеза управляющих воздействий, минимизирующего заданные функционалы в реальном режиме времени, без участия лица, принимающего решение.

#### **3.1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ, ОПИСЫВАЮЩИХ ОБЪЕКТ НА МНОЖЕСТВЕ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ, С УЧЕТОМ ЕГО НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ**

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.

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 [20].

Модели множества  $M_k$  идентифицируются по следующей методике. Задаются:

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

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

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

$$M_{hp} = \{M_j, j = 1, 2, \dots\}; \quad (3.2)$$

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

$$\tilde{y}(t) = \phi_j(\tilde{z}(t)); \quad (3.3)$$

– 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

$$E(t_i) = y(t_i) - \tilde{y}(t_i), \quad (3.4)$$

т.е.

$$\max_{t_i} |E(t_i)| \leq E_{\text{доп}} \quad (3.5)$$

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

$$\mathcal{E} = \int_{t_0}^{t_k} q(E(t)) dt \rightarrow \min, \quad (3.6)$$

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

$$M^0 = (f^0, \phi^0), \quad (3.7)$$

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;

$$I_1(y, \tilde{y}) = \max_t |y(t) - \tilde{y}(t)|, \quad t \in [0; T]; \quad (3.8)$$



– возможные виды нелинейностей объекта

$$\pi = \{\pi_k, k = 1, 2, \dots\}, \quad (3.9)$$

здесь  $\pi_k$  – нелинейность  $k$ -го вида.

Требуется, используя массивы (3.1), множество моделей (3.2) и виды нелинейностей (3.9), определить структуру модели

$$SM = (M_j, \pi_k, H_i^{\text{мд}}), \quad (3.10)$$

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

Структура  $SM$  считается допустимой, если выполняются условия:

– согласованности экспериментальных и расчетных значений выхода в виде траекторий

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

и

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

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

$$SM = \{SM_j, j = 1, 2, \dots\}. \quad (3.11)$$

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.

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

$$\dot{z} = bu(t); \quad (3.12)$$

«А» – инерционный объект первого порядка (апериодическое звено)

$$\dot{z} = az(t) + bu(t); \quad (3.13)$$

«ДИ» обозначает двойной интегратор

$$\dot{z}_1 = z_2(t), \quad \dot{z}_2 = bu(t); \quad (3.14)$$

«АИ» – апериодическое звено и интегратор (реальный двойной интегратор)

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2(t), \\ \dot{z}_2 &= az_2(t) + bu(t), \end{aligned} \quad (3.15)$$

а «ДА» обозначает двойное апериодическое звено

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2(t), \\ \dot{z}_2 = a_1 z_1(t) + a_2 z_2(t) + bu(t). \end{cases} \quad (3.16)$$

Модели, задаваемые уравнениями (3.12) – (2.16), 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.

$$\forall t \in [t_0, t_k]; \quad \max\{|y(t_i) - z_1(t_i)|, 1 = 0, 1, \dots, k\} \leq \Delta Y_{\text{доп}}, \quad (3.17)$$

где  $\Delta Y_{\text{доп}}$  – допустимая абсолютная погрешность. Например, при нагреве  $\Delta Y_{\text{доп}}$  берется 2 °С.

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

$$\dot{z} = A_j z(t) + B_j u(t), \quad j = 1, \dots, m, \quad (3.18)$$

где  $A_j, B_j$  – значения параметров модели для  $j$ -го диапазона выходной переменной;  $m$  – число диапазонов (стадий) на всем 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 [21].

Интегратор (см. (3.12)) имеет вид

$$\hat{b}(t_i) = \frac{y(t_{i+1}) - y(t_i)}{u(t_i) \Delta t}, \quad (3.19)$$

здесь минимальный временной интервал расчета совпадает с временным шагом дискретизации  $\Delta t$ .

Инерционный объект первого порядка (апериодическое звено) (см. (3.13)) задается следующими условиями:

$$\begin{aligned} \hat{a}_i &= \frac{1}{\Delta t} \ln c_i, \\ b_i &= \frac{d_i \hat{a}_i}{c_i - 1}, \\ c_i &= \frac{y(t_i) u(t_i) - y(t_{i+1}) u(t_{i-1})}{\Delta_i}, \\ d_i &= \frac{y(t_{i+1}) y(t_{i-1}) - y^2(t_i)}{\Delta_i}, \end{aligned} \quad (3.20)$$

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

здесь минимальный временной интервал расчета равен  $2 \Delta t$ , т.е.

$$[t_n; t_k] = [t_{i-1}; t_{i+1}].$$

Объект двойного интегрирования (см. (3.14)) определяется как

$$\hat{b}_i = \frac{y(t_{i+1}) - y(t_i) - \hat{z}_2(t_i)\Delta t}{u(t_i)\Delta t^2}, \quad (3.21)$$

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

$$\left. \begin{aligned} (t_j - t_i)\hat{z}_2(t_i) + \frac{u_{ij}}{2}(t_j - t_i)^2\hat{b} &= y(t_j) - y(t_i), \\ (t_k - t_i)\hat{z}_2(t_i) + \frac{u_{ik}}{2}(t_k - t_i)^2\hat{b} &= y(t_k) - y(t_i); \\ i < j < k, \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

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. (3.15)) параметры  $a$ ,  $b$  определяются решением следующих простых уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \hat{z}_2(t_i)c + d(c - \Delta t)u_i &= y(t_{i+1}) - y(t_i), \\ \hat{z}_2(t_{i+1})c + d(c - \Delta t)u_{i+1} &= y(t_{i+2}) - y(t_{i+1}); \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

$$\hat{a} = \frac{e^{a\Delta t} - 1}{c}, \quad \hat{b} = d\hat{a}. \quad (3.24)$$

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

$$\left. \begin{aligned} \hat{z}_2(t_i) + \hat{a}\Delta y_1 + \hat{b}\Delta t u &= z_2(t_{i+1}), \\ \hat{z}_2(t_i) + \hat{a}\Delta y_2 + \hat{b}2\Delta t u &= z_2(t_{i+2}), \\ \hat{z}_2(t_i) + \hat{a}\Delta y_3 + \hat{b}3\Delta t u &= z_2(t_{i+3}); \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

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:

$$\hat{a}_1 = \frac{d_1}{c_2}, \quad \hat{a}_2 = \frac{d_2 - 1}{c_2}, \quad \hat{b} = \frac{d_3}{c_2}. \quad (3.26)$$

Необходимо отметить, что в приведенных формулах оценки параметров (3.19) – (3.26) в качестве  $\Delta t$  могут использоваться временные интервалы, кратные  $\Delta t$ , т.е.  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$  и т.д.

Наряду с формулами оценки параметров фрейм аппроксимации содержит расчетные соотношения для сглаживания экспериментальных зависимостей. Здесь используется стандартный метод сглаживания четвертыми разностями и оригинальный метод избирательного сглаживания выделяемых зон [21].

### 3.2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ МНОГОКАМЕРНОГО ТТА С УЧЕТОМ СТАДИЙ РАЗОГРЕВА И ВЛИЯНИЯ СОСЕДНИХ КАМЕР, ПРИГОДНЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Особенностями идентификации моделей многокамерных объектов является учет влияния камер друг на друга. Рассмотрим идентификацию структуры модели на примере СВЛ [22]. Упрощенная схема многокамерной СВЛ представлена на рис. 3.1.

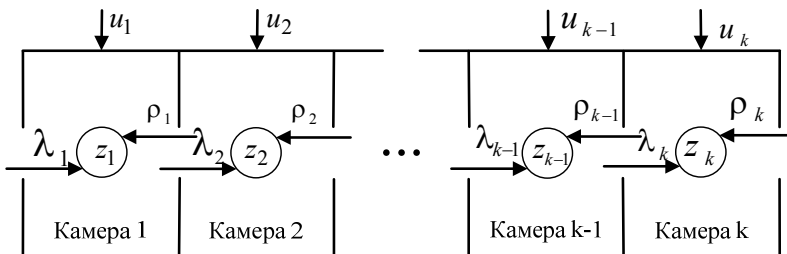


Рис. 3.1. Схема многокамерной СВЛ

На схеме обозначено:  $z_i, i = \overline{1, k}$  – температура в  $i$ -й камере ( $^{\circ}\text{C}$ );  $u_i$  – управляющее воздействие (процент открытия вентиля подачи пара, %);  $\lambda_i, \rho_i$  – 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 [23]. Динамика процесса нагрева СВЛ описывается множеством моделей для отдельных камер

$$M_{hp} = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k\}, \quad (3.27)$$

где  $\mu_i, i = \overline{1, k}$  – модель  $i$ -й камеры, имеющая следующий вид:

$$\mu_i : \dot{z}_i = \begin{cases} A_i^1 z_i^1(t) + B_i^1 u_i^1(t) + C_i^1 \lambda_i^1(t) + D_i^1 \rho_i^1(t), & z_i^1 \in [z_0^1, z_k^1]; \\ A_i^2 z_i^2(t) + B_i^2 u_i^2(t) + C_i^2 \lambda_i^2(t) + D_i^2 \rho_i^2(t), & z_i^2 \in [z_0^2, z_k^2]; \\ \dots & \dots \\ A_i^j z_i^j(t) + B_i^j u_i^j(t) + C_i^j \lambda_i^j(t) + D_i^j \rho_i^j(t), & z_i^j \in [z_0^j, z_k^j], \end{cases} \quad (3.28)$$

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:

$$\lambda_i^j(t) = z_i^j(t) - z_{i-1}^j(t), \quad \rho_i^j(t) = z_i^j(t) - z_{i+1}^j(t).$$

Каждая зона системы (3.28) представима одной из базовых динамических моделей (3.12) – (3.16) [21].

В целях 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  $\Delta z$  [24].

### 3.3. МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ РЕЖИМА «ПУСК» НА МНОЖЕСТВЕ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Основу алгоритмизации синтеза энерго- и(или) ресурсосберегающего управления представляет методика идентификации математической модели динамики объекта с учетом его множества состояний функционирования в ходе реальной эксплуатации [21].

Методика идентификации модели динамики состоит в выполнении следующих этапов. Экспериментальным или аналитическим путем, 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  $y(t_i)$   $i = 0, 1, 2, \dots$  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 расчеты:

а) для выбранной модели производится текущая оценка ее параметров по формулам (3.19) – (3.26) с минимальным шагом временной дискретизации, при этом верхняя граница каждой зоны берется 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 ее вид, либо границы зоны.

Заметим, что увеличение числа зон приводит к увеличению точности модели, но в то же время дает рост объема вычислений при синтезе управляющих воздействий. Обычно число зон выбирают равных трем, что позволяет адекватно описывать исследуемые процессы и оперативно синтезировать управляющие воздействия [21].

### **3.4. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛАЖНОСТИ ПАСТООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ЕГО СУШКИ В ВАЛЬЦЕЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ**

При оптимальном управлении процессом в целях 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 [25]. 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 [26].

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 [26].

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 взята для конкретной СВЛ, установленной в ОАО «Пигмент», г. Тамбов).

II. Разделение собранных статистических данных на обучающую и тестовую выборки. Выделение обучающей и тестовой части выборки достаточно произвольно.

III. Нормировка собранных данных – приведение их к виду, пригодному для подачи на входы нейронной сети. Нормировка производится в целях 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.

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 несколько 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  $\varphi_i^k$  на выходе  $i$ -й камеры с использованием аналитической модели производится следующим образом [25].

Измерения проводят группами датчиков – общими, и датчиками, установленными в  $i$ -й 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  $i$ -й камере [25].

Общие датчики предназначены для определения: влажности и температуры окружающей среды, включения/выключения вытяжного вентилятора, наличия/отсутствия ворошителя, скорости движения пластинчатого конвейера. Датчики, установленные в  $i$ -й камере, предназначены для определения: влажности и температуры сушильного агента, степени открытия воздухозаборного окна и шиберов. На основании информации, полученной от датчиков, и известного значения начальной влажности материала рассчитываются значения входов нейронной сети [25].

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  $i$ -й камере;  $x_9, x_{10}$  – процента открытия воздухозаборного окна и сбросного шиберов. Обучение нейронной сети организуют по образцовым мерам технологических параметров в адаптивном диапазоне  $i$ -й камеры с фиксированной точностью. Нормализация данных производится по следующей формуле:



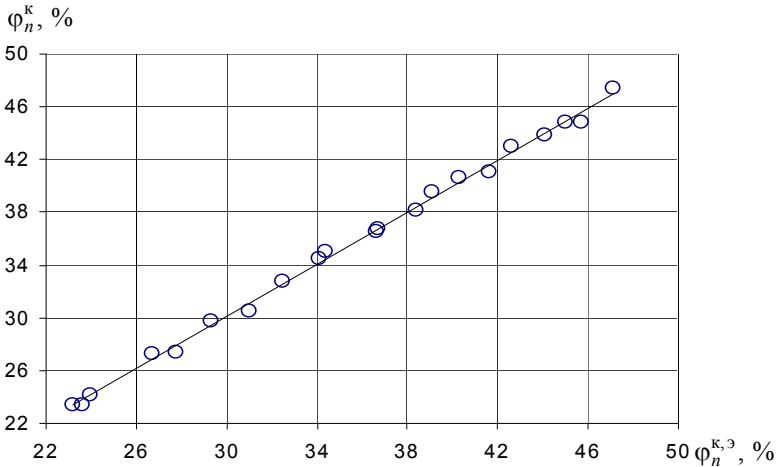
Для получения данных о влажности материала  $\varphi_i$  в реальных единицах измерения выходной сигнал сети денормализуют по формуле

$$\varphi_i = \frac{\bar{\varphi}_i - K_{\text{оф}}^{\text{дн}}}{K_{\text{амп}}^{\text{дн}}}, \quad (3.31)$$

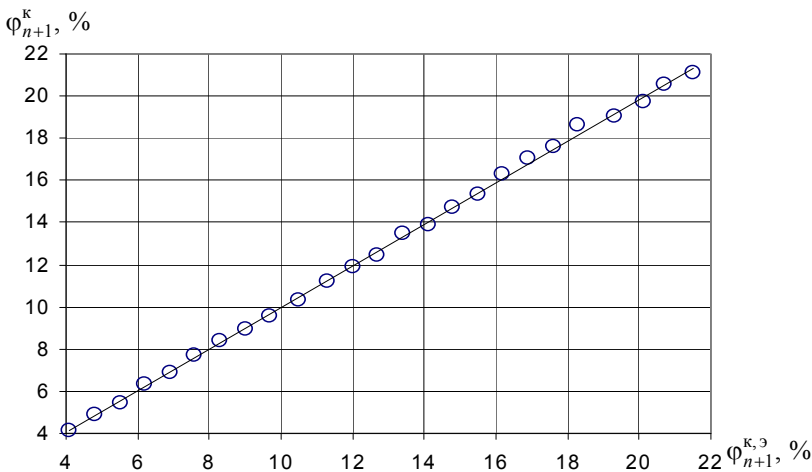
где  $K_{\text{амп}}^{\text{дн}}, K_{\text{оф}}^{\text{дн}}$  – амплитудный и офсетный коэффициенты денормализации [27].

Полученная аналитическая зависимость (3.30) позволяет оценивать влажность материала в  $i$ -й камере сушильной установки в реальном времени в процессе его сушки. Аналогично строятся модели и для других камер.

В целях проверки адекватности полученных нейронных сетей была произведена оценка погрешностей расчета по моделям и были построены графики зависимостей влажности пастообразного материала в пятикамерной СВЛ, рассчитанной для двух лимитирующих камер (второй и третьей  $n=2$  и  $n+1=3$ ) по моделям  $\varphi_n^{\text{к}}$  и  $\varphi_{n+1}^{\text{к}}$  от определенной экспериментально  $\varphi_n^{\text{к,э}}$  и  $\varphi_{n+1}^{\text{к,э}}$  (см. корреляционные диаграммы на рис. 3.2 и 3.3). Из них видно, что нейронные сети дают достаточно точную оценку реальной влажности исследуемого пастообразного материала [25].



**Рис. 3.2.** Корреляционная диаграмма влажности материала во второй камере пятисекционной сушильной установки



**Рис. 3.3. Корреляционная диаграмма влажности материала в третьей камере пятикамерной СВЛ**

В нашем случае относительная погрешность оценки влажности с использованием нейронных сетей не более 2%. Построенная нейронная сеть устойчива к действию дестабилизирующих факторов в некоторых связях, так как 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 [27].

### **3.5. ПРОЦЕДУРНАЯ МОДЕЛЬ КЛАССИФИКАЦИИ ВОЗМОЖНЫХ СИТУАЦИЙ В ТТА**

Важное значение играет определение числовых оценок мер доверия к требуемой влажности материала на выходе сушильной установки  $m(\phi_k^к)$ . Учитывая маленькое абсолютное значение ( $<1\%$ ) влажности материала на выходе сушильной установки  $\phi_k^к$ , оценка ее по аналитическим моделям, имеющим погрешность 2%, нежелательна. Поэтому, используя накопленный опыт экспертов в виде нормированных диапазонов ( $G_n^x, G_n^{уд}, G_n^{пл}, G_{n+1}^x, G_{n+1}^{уд}, G_{n+1}^{пл}$ , где верхние индексы означают: x – влажность хорошая; уд – влажность удовлетворительная; пл – влажность плохая, а нижние индексы соответствуют номеру камеры), и числовых оценок двух свидетельств  $m_1(W)$  и  $m_2(D)$ ,

методом Демпстера–Шафера, определяется новое подмножество гипотез  $\mathcal{V}$ , т.е.  $m_3(\mathcal{V})$ . Значение  $m_3(\mathcal{V})$  рассчитывается по формуле

$$m_3(\mathcal{V}) = \frac{\sum_{\mathcal{W} \cap \mathcal{D} = \mathcal{V}} m_1(\mathcal{W}) m_2(\mathcal{D})}{1 - \sum_{\mathcal{W} \cap \mathcal{D} = \emptyset} m_1(\mathcal{W}) m_2(\mathcal{D})}, \quad (3.32)$$

где  $\mathcal{W}$  – подмножество гипотез, базирующихся на значении влажности материала  $\varphi_n$ ;  $\mathcal{D}$  – подмножество гипотез, основанных на значении влажности материала  $\varphi_{n+1}$ . Значения  $m_3(\mathcal{V})$ , рассчитанные для каждого нормированного диапазона, представляют собой числовые оценки мер доверия достижения требуемой влажности материала на выходе СВЛ [28].

Приведем пример определения числовых оценок мер доверия, достижения требуемой влажности материала на выходе пятисекционной СВЛ. На основе высказывания экспертов влажность материала в каждой лимитирующей камере ( $n = 2, n + 1 = 3$ ) разбита на 3 нормированных диапазона. По каждому нормированному диапазону экспертами назначены меры доверия:

– к событию  $\mathcal{A}$ , что процесс сушки завершится хорошо, т.е. на выходе мы получим материал с влажностью не более 0,5% ( $\varphi_{k=5}^k < 0,5\%$ );

– к событию  $\mathcal{B}$ , означающему, что процесс сушки завершится удовлетворительно, т.е. на выходе мы получим материал с влажностью от 0,5% до 1% ( $0,5\% \leq \varphi_{k=5}^k \leq 1\%$ );

– к событию  $\mathcal{C}$ , которое показывает, что процесс сушки завершится плохо, т.е. на выходе мы получим материал с влажностью более 1% ( $\varphi_{k=5}^k > 1\%$ );

– к остальным элементам группы  $\mathcal{Q}$  взаимоисключающих событий [19].

Назначенные экспертами меры доверия приведены в табл. 3.1.

Рассмотрим случай, когда влажность материала в  $n$ -й камере  $\varphi_n = 41\%$ , а в  $(n + 1)$ -й  $\varphi_{n+1} = 8,7\%$ . Для этих данных в расчете меры доверия к требуемой влажности материала на выходе сушилки будут участвовать следующие подмножества:

$$m_1\{\mathcal{A}\} = 0,4; \quad m_1\{\mathcal{B}\} = 0,43; \quad m_1\{\mathcal{C}\} = 0,15; \quad m_1\{\mathcal{Q}\} = 0,02; \quad \text{и}$$

$$m_2\{\mathcal{A}\} = 0,85; \quad m_2\{\mathcal{B}\} = 0,1; \quad m_2\{\mathcal{C}\} = 0,04; \quad m_2\{\mathcal{Q}\} = 0,01.$$

### 3.1. Оценки экспертов

Диапазон влажности, %	Обозначение диапазона	Сушка завершится хорошо $m(A)$	Сушка завершится удовлетворительно $m(B)$	Сушка завершится плохо $m(C)$	Остальные возможные ситуации $m(Q)$
Камера $n = 2$ $m_1(W)$					
< 40	$G_{n=2}^x$	0,65	0,27	0,07	0,01
от 40 до 50	$G_{n=2}^{уд}$	0,4	0,43	0,15	0,02
> 50	$G_{n=2}^{пл}$	0,15	0,32	0,5	0,03
Камера $n + 1 = 3$ $m_2(D)$					
< 14	$G_{n+1=3}^x$	0,85	0,1	0,04	0,01
от 14 до 18	$G_{n+1=3}^{уд}$	0,3	0,54	0,14	0,02
> 18	$G_{n+1=3}^{пл}$	0,05	0,22	0,7	0,03

Объединение подмножеств  $m_1$  и  $m_2$  по двум камерам без учета коэффициента нормализации приведено в табл. 3.

Так как знаменатель в формуле (3.6) равен

$$1 - \sum_{W \cap D = \emptyset} m_1(W)m_2(D) = 0,4188,$$

то числовые оценки мер доверия, полученные по результатам объединения двух подмножеств, имеют следующие значения:  $m_3\{A\} = 0,863$ ;  $m_3\{B\} = 0,119$ ;  $m_3\{C\} = 0,017$ ;  $m_3\{Q\} = 0,001$ . Таким образом, числовые оценки мер доверия: к событию  $A$  (процесс сушки завершится хорошо) равна 0,863, т.е. достаточно высока, к событию  $B$  (процесс сушки завершится удовлетворительно) – 0,119, к событию  $C$  (процесс сушки завершится плохо), равна 0,017, мера доверия к возникновению остальных возможных ситуаций – 0,001. Аналогично рассчитываются числовые оценки мер доверия для всех остальных комбинаций диапазонов влажности материала в  $n$ -й и  $(n + 1)$ -й камерах.

### 3.2. Объединение свидетельств $m_1$ и $m_2$

$m_1$	$m_2$	$m_3$
1	2	3
$m_1\{A\} = 0,4$	$m_2\{A\} = 0,85$	$m_3\{A\} = 0,34$
$m_1\{B\} = 0,43$	$m_2\{A\} = 0,85$	$m_3\{\emptyset\} = 0,3655$
$m_1\{C\} = 0,15$	$m_2\{A\} = 0,85$	$m_3\{\emptyset\} = 0,1275$
$m_1\{Q\} = 0,02$	$m_2\{A\} = 0,85$	$m_3\{A\} = 0,017$
$m_1\{A\} = 0,4$	$m_2\{B\} = 0,1$	$m_3\{\emptyset\} = 0,04$
$m_1\{B\} = 0,43$	$m_2\{B\} = 0,1$	$m_3\{B\} = 0,043$
$m_1\{C\} = 0,15$	$m_2\{B\} = 0,1$	$m_3\{\emptyset\} = 0,015$
$m_1\{Q\} = 0,02$	$m_2\{B\} = 0,1$	$m_3\{B\} = 0,002$
$m_1\{A\} = 0,4$	$m_2\{C\} = 0,04$	$m_3\{\emptyset\} = 0,016$
$m_1\{B\} = 0,43$	$m_2\{C\} = 0,04$	$m_3\{\emptyset\} = 0,0172$
$m_1\{C\} = 0,15$	$m_2\{C\} = 0,04$	$m_3\{C\} = 0,006$
$m_1\{Q\} = 0,02$	$m_2\{C\} = 0,04$	$m_3\{C\} = 0,0008$
$m_1\{A\} = 0,4$	$m_2\{Q\} = 0,01$	$m_3\{A\} = 0,004$
$m_1\{B\} = 0,43$	$m_2\{Q\} = 0,01$	$m_3\{B\} = 0,0043$
$m_1\{C\} = 0,15$	$m_2\{Q\} = 0,01$	$m_3\{C\} = 0,0015$
$m_1\{Q\} = 0,02$	$m_2\{Q\} = 0,01$	$m_3\{Q\} = 0,0002$

Итерационную процедуру определения меры доверия к требуемой влажности материала на выходе сушильной установки можно представить в следующем виде:

$$m(\varphi_k^k) = \text{Алг}_{\text{ДШ}}(\varphi_n, \varphi_{n+1}, \varepsilon), \quad (3.33)$$

где  $\text{Алг}_{\text{ДШ}}$  – алгоритм метода Демпстера–Шафера;  $\varepsilon$  – экспертные знания в виде числовых оценок.



### 3.3. Числовые оценки мер доверия к требуемой влажности материала на выходе сушильной установки

№	Ситуации	$m(A)$	$m(B)$	$m(C)$	$m(Q)$	$\Phi_{k=5}^k$
1	$(G_{n=2}^{пл}, G_{n+1=3}^{пл})$	0,027	0,178	0,793	0,002	2,34
2	$(G_{n=2}^{уд}, G_{n+1=3}^{пл})$	0,123	0,416	0,459	0,002	1,77
3	$(G_{n=2}^{пл}, G_{n+1=3}^{уд})$	0,169	0,579	0,25	0,002	1,51
4	$(G_{n=2}^x, G_{n+1=3}^{пл})$	0,29	0,386	0,322	0,002	1,42
5	$(G_{n=2}^{уд}, G_{n+1=3}^{уд})$	0,325	0,61	0,065	0,001	1,08
6	$(G_{n=2}^x, G_{n+1=3}^{уд})$	0,555	0,412	0,033	0,0005	0,96
7	$(G_{n=2}^{пл}, G_{n+1=3}^x)$	0,705	0,174	0,12	0,001	0,64
8	$(G_{n=2}^{уд}, G_{n+1=3}^x)$	0,862	0,118	0,02	0,0005	0,48
9	$(G_{n=2}^x, G_{n+1=3}^x)$	0,942	0,051	0,0065	0,0002	0,35

Полученные значения всех возможных комбинаций для пяти-секционной СВЛ приведены в табл. 3.3. В последней графе таблицы приведена влажность материала на выходе сушильной установки  $\Phi_{k=5}^k$ , соответствующая приведенным ситуациям, полученная путем лабораторных замеров.

Таблица 3.3 предназначена для оперативного определения числовой оценки меры доверия к требуемой влажности материала на выходе сушильной установки [19].

## 4. АНАЛИЗ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МСФ

В разделе рассматривается оперативный интеллектуальный синтез управляющих воздействий с учетом изменений состояний функционирования оборудования составляющего ТТА для двух режимов «Пуск» и «Процесс». Под режимом «Пуск» понимаются управляемые динамические процессы запуска оборудования, а под режимом «Процесс» – управляемые статические процессы функционирования ТТА.

### 4.1. РЕЖИМ «ПУСК»

Постановку задачи оптимального управления (ЗОУ) динамическими режимами «ПУСК» объектов ТТА на множестве состояний функционирования (МСФ) в обобщенном виде можно представить следующим образом. Задаются:

- модели динамики объекта на МСФ  $M_h$  :

$$\dot{z} = f_1(A, B, z, u, h, t), \quad (4.1)$$

где  $A, B$  – матрицы параметров модели объекта;  $z, u$  – векторы фазовых координат и управляющих воздействий;  $h \in \mathcal{H}$  – переменная состояния функционирования;

– ограничения на изменение фазовых координат, управляющих воздействий и минимизируемый функционал, т.е.

$$z(t_{0h}) = z_h^0 \rightarrow z(t_{kh}) = z_h^k, \quad (4.2)$$

$$\forall t \in [t_{0h}, t_{kh}]: u(t/h) \in [u_{nh}, u_{bh}], \quad (4.3)$$

$$J = \int_{t_{0h}}^{t_{kh}} g(t, z(t/h), u(t/h)) dt \rightarrow \min_u, \quad (4.4)$$

где  $z_h^0$  и  $z_h^k$  – начальное и конечное состояния вектора фазовых координат;  $u_{nh}$  и  $u_{bh}$  – нижняя и верхняя границы управления;  $t_{0h}, t_{kh}$  – начальное и конечное время;  $J$  – минимизируемый функционал;

- массив исходных данных ЗОУ:

$$\mathfrak{R} = \{ A, B, z_{0h}, z_{kh}, u_{nh}, u_{bh}, t_{0h}, t_{kh}, h \}.$$

Необходимо перевести объект, представленный моделью (4.1), из начального состояния  $z_{0h}$  в конечное  $z_{kh}$  за фиксированный интервал времени при ограничении на управляющие воздействия (4.3) с минимумом функционала (4.4) и с учетом текущего состояния функционирования  $h$ .

Решить ЗОУ (4.1) – (4.4) – значит, для заданного массива  $\mathfrak{R}$  определить вид функции ОУ  $u^*(t/h)$ ,  $t \in [t_0, t_k]$ , рассчитать ее параметры, определить оптимальную траекторию изменения фазовых координат  $z^*(t/h)$  и значение функционала  $J$ , в котором  $g$  – вид функции

управления «расход топлива»  $J_T = \int_{t_{0h}}^{t_{kh}} |u(t/h)| dt \rightarrow \min_u$  или «затраты

энергии»  $J_3 = \int_{t_{0h}}^{t_{kh}} u^2(t/h) dt \rightarrow \min_u$ , в зависимости от объекта управления.

Методика полного анализа энерго- и ресурсосберегающего управления на МСФ включает следующие этапы:

- 1) получение условий существования решений задач управления;
- 2) определение возможных видов функций управления  $u_h(t)$ ,  $h \in H$ ;
- 3) введение нормированной задачи;
- 4) введение синтезирующих переменных;
- 5) построение и анализ областей существования видов функций управления в пространстве синтезирующих переменных нормированной задачи;
- 6) разработка алгоритмов расчета параметров функций управления.

Практическое значение получения синтезирующих переменных состоит в том, что без определения вида функции управления можно непосредственно по значениям массива исходных данных ЗОУ проверить, существует ли решение задачи (4.1) – (4.3) для функционала (4.4), или нет. Метод синтезирующих переменных предполагает введение некоторого синтезирующего вектора, размерность которого значительно меньше размерности массива реквизитов задачи энерго- и ресурсосберегающего управления, и который однозначно определяет вид и параметры функции управления.

В состоянии  $h \in H$  условия управляемости применительно к задаче (4.1) – (4.3) определяются следующим образом: решение задачи

в состоянии  $h$  на интервале времени  $[\theta_{0h}, t_{kh}]$  существует, если существует  $u_h(t)$ , которое удовлетворяет одновременно ограничению (4.3) и условию достижения конечного состояния

$$\int_{\theta_h}^{t_{kh}} e^{a_h(t_{kh}-t)} u_h(t) dt = \frac{1}{b_h} (z_{kh} - z_{oh} e^{a_h(t_{kh}-\theta_h)}). \quad (4.5)$$

Следует заметить, что, как правило, по каналам управления и измерения действуют дестабилизирующие факторы (ДФ), оказывающие существенное влияние на качество управления. Действующие на объекты управления дестабилизирующие факторы оказывают существенное влияние на работу ИИУС ТГА, в частности, снижают точность выхода на заданные технологические режимы, приводят к увеличению потребления энергоресурсов и погрешностям при оценке параметров математических моделей, описывающих динамические режимы работы. Поэтому важно при анализе и синтезе ИИУС учитывать влияние ДФ.

Сформулируем математически постановку задачи оптимального управления объектом, с учетом ДФ по каналу управления, представляющие собой случайный процесс типа «шум». Пусть модель динамики объекта для программной стратегии управления представлена в виде

$$\dot{z} = \mathbf{A}z(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{C}w(t). \quad (4.6)$$

Требуется перевести объект за фиксированный временной интервал  $[t_0, t_k]$  из начального состояния в конечную область

$$z(t_0) = z^0, z(t_k) \in \chi^k, \quad (4.7)$$

при ограничении на управляющее воздействие и шум

$$\forall t \in [t_0, t_k], u(t) \in [u_n, u_b], w(t) \in [w_n, w_b], \quad (4.8)$$

с минимумом функционала

$$J_3 = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \rightarrow \min. \quad (4.9)$$

Здесь  $z(t)$  – фазовые координаты;  $u(t)$  – управляющее воздействие;  $w(t)$  – шум в канале управления;  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  – матрицы параметров модели объекта;  $J_3$  – минимизируемый функционал (затраты энергии);  $u_n, u_b, w_n, w_b$  – границы изменения управляющего воздействия и

шума;  $z^0, \chi^k(\cdot)$  – начальное значение фазовой координаты и конечная область, в которую требуется перевести объект;  $[t_0, t_k]$  – временной интервал управления. Массив исходных данных (массив реквизитов) для численного решения задачи имеет вид

$$\mathfrak{R} = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, u_n, u_b, z^0, \chi^k(\cdot), t_0, t_k, w_n, w_b). \quad (4.10)$$

Для выполнения расширенного анализа будем использовать математический аппарат принципа максимума и метода синтезирующих переменных.

**Определение 1.** Назовем анализ оптимального управления объектом с учетом ДФ *расширенным анализом*.

Можно выделить следующие этапы проведения расширенного анализа оптимального управления.

1. Вводится базовая (нормированная) задача оптимального управления, учитывающая наличие ДФ, действующих на объект.
2. Определяются синтезирующие переменные с учетом ДФ.
3. Находятся условия существования решения ЗОУ.
4. Находятся соотношения для границ областей, соответствующих различным видам синтезирующих функций.

Рассмотрим предложенный алгоритм расширенного анализа на примере объекта первого порядка. 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. [29 – 34]):

$$\dot{z} = a_h z(t) + b_h u(t), \quad (4.11)$$

где  $a_h$  и  $b_h$  – параметры объекта управления в состоянии  $h$ . Из литературных источников [35, 36] известно, что модели динамики двигателей часто описываются этим объектом.

Большое значение для оперативного решения ЗОУ имеет установление соответствия между функцией оптимального управления и массивом исходных данных. В целях установления этого соответствия вводится базовая или нормированная задача.

**Определение 2.** Базовой (нормированной) задачей называется задача, в которой постоянны временной интервал, область допустимых управлений и возмущений.

Осуществим переход от реальной к нормированной задаче посредством следующего нормирования для:

- временного интервала

$$t \in [t_0, t_k] \rightarrow T \in [0, 2],$$

- интервала управления

$$u(t) \in [u_H, u_B] \rightarrow U(T) \in [-1, 1],$$

- действующего возмущения

$$w(t) \in [w_H, w_B] \rightarrow W(T) \in [-1, 1].$$

Таким образом, задача (4.6) – (4.9) для объекта первого порядка будет иметь следующий вид:

$$\dot{z} = az(t) + bu(t) + cw(t) \rightarrow \dot{Z} = AZ(T) + BU(T) + CW(T). \quad (4.12)$$

Здесь

$$A = a \frac{\Delta t}{2}, \quad B = b \frac{\Delta u}{2} \frac{\Delta t}{2}, \quad C = c \frac{\Delta w}{2} \frac{\Delta t}{2},$$

$$\Delta t = t_k - t_0, \quad \Delta u = u_B - u_H, \quad \Delta w = w_B - w_H.$$

**Утверждение 1.** Переход от исходной задачи к нормированной будем осуществлять по следующим формулам для:

времени

$$T = 2 \frac{t - t_0}{t_k - t_0},$$

управления

$$U = \frac{u - u_0}{u_B - u_0}, \quad u_0 = \frac{u_H + u_B}{2},$$

возмущающего воздействия

$$W = \frac{w - w_0}{w_B - w_0}, \quad w_0 = \frac{w_H + w_B}{2},$$

а обратно от нормированной задачи к исходной – по формулам для:

времени

$$t = \frac{t_k - t_0}{2} T + t_0,$$

управления

$$u = U(u_B - u_0) + u_0,$$

возмущения

$$w = W(w_B - w_0) + w_0.$$

Для определения синтезирующих переменных необходимо решить задачу Коши относительно уравнения (4.12). Ее решение имеет следующий вид:

$$Z(t_k) = e^{2A} Z(t_0) + \int_0^2 e^{A(2-S)} [BU(S) + CW(S)] dS. \quad (4.13)$$

**Утверждение 2.** Синтезирующие переменные

$$A = a \frac{\Delta t}{2},$$

$$L = \frac{Z(t_k) - Z(t_0)e^{2A}}{B} = \int_0^2 e^{A(2-S)} U(S) dS + \frac{C}{B} \int_0^2 e^{A(2-S)} W(S) dS \quad (4.14)$$

задачи (4.6) – (4.9) рассчитываются по массиву реквизитов (4.10), однозначно определяют положение точки на синтезирующей плоскости.

Подставляя в (4.14) нормированные граничные значения управляющего воздействия и помехи, можно получить границы области существования решения ЗОУ  $A < 0$ .

**Утверждение 3.** При наличии помехи по каналу управления внешние границы превращаются в «коридоры», ширина которых зависит от интенсивности помехи

$$u(t) = u_H, \quad w(t) = w_H : L_{\min}^{(-)}(A) = -\frac{e^{2A} - 1}{A} \left(1 + \frac{C}{B}\right),$$

$$u(t) = u_H, \quad w(t) = w_B : L_{\max}^{(-)}(A) = -\frac{e^{2A} - 1}{A} \left(1 - \frac{C}{B}\right),$$

$$u(t) = u_B, \quad w(t) = w_H : L_{\min}^{(+)}(A) = \frac{e^{2A} - 1}{A} \left(1 - \frac{C}{B}\right),$$

$$u(t) = u_B, \quad w(t) = w_B : L_{\max}^{(+)}(A) = \frac{e^{2A} - 1}{A} \left(1 + \frac{C}{B}\right).$$

Графическое представление области существования решения приведено на рис. 4.1.

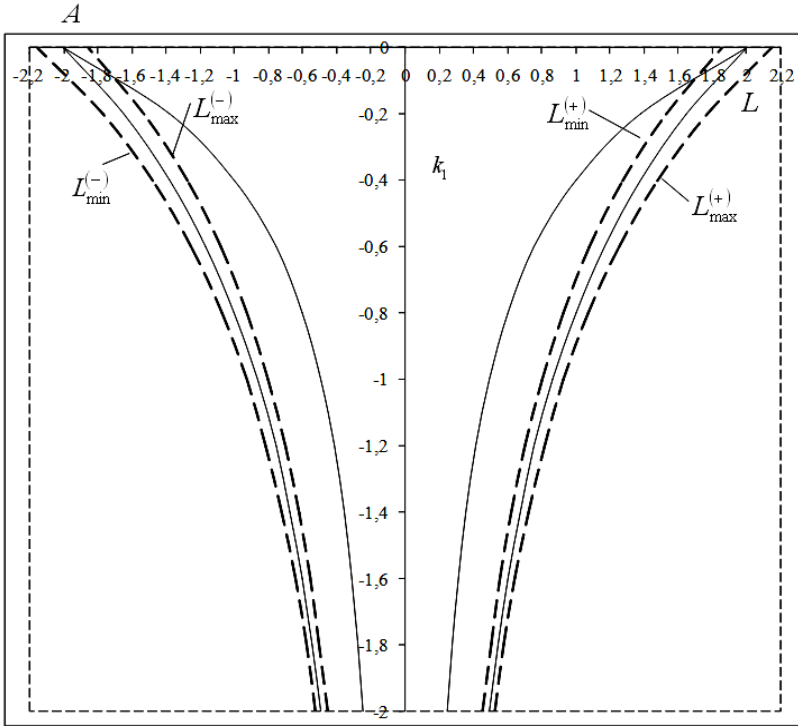


Рис. 4.1. Область существования решения задачи управления на МСФ

**Утверждение 4.** Существование решения задачи управления при наличии помехи зависит от места расположения точки с координатами  $(A, L)$  в области существования решения. А именно, если:

1.  $L \notin [L_{\min}^{(-)}, L_{\max}^{(+)}]$  – решение задачи управления не существует;
2.  $L \in [L_{\min}^{(-)}, L_{\max}^{(-)}]$  или  $L \in [L_{\min}^{(+)}, L_{\max}^{(+)}]$  – возможность существования решения задачи управления определяется характером влияния помех в канале управления;
3.  $L \in [L_{\max}^{(-)}, L_{\min}^{(+)}]$  – решение задачи управления существует.

Выбор стратегии управления обусловлен соотношением сигнал-шум. Если интенсивность помехи мала, то в этом случае возможно использование программной стратегии. В остальных случаях применяется позиционная стратегия.



При позиционной стратегии управления в зависимости от массива реквизитов на каждом шаге пересчитываются значения вектора синтезирующих переменных, которые однозначно определяют зону и вид функции управления. В случае работы в условиях помех по каналам управления и измерения вектор синтезирующих переменных может выходить за границы первоначально выбранной зоны (при этом синтезирующая функция меняет вид) или за границы области существования решения задачи управления. Поэтому на стадии анализа необходимо учитывать наличие ДФ.

При позиционной стратегии управления модель динамики объекта в дискретной форме задается в виде уравнений состояния и наблюдения

$$z_i = Fz_{i-1} + G(u_{i-1} + w_{i-1}), \quad i = \overline{1, N}, \quad F = e^{a\delta t}, \quad G = -\frac{b}{a}(1 - e^{a\delta t}), \quad (4.15)$$

$$y_i = z_i + v_i.$$

Требуется перевести объект за фиксированное количество шагов  $N$  из начального состояния в конечную область

$$z_0 = z^0, \quad z_N \in [z_H^k; z_B^k], \quad (4.16)$$

при ограничении на управляющее воздействие на каждом шаге

$$\forall i \in [0, N-1], \quad u_i \in [u_H, u_B], \quad (4.17)$$

с минимумом функционала

$$J_3 = \delta t \sum_{i=1}^N u_i^2 \rightarrow \min_u. \quad (4.18)$$

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  $\sigma_w$  и  $\sigma_v$  соответственно;  $F, G, a, b$  – параметры модели динамики объекта;  $J_3$  – минимизируемый функционал (затраты энергии);  $u_H, u_B$  – границы изменения управляющего воздействия;  $z^0, [z_H^k; z_B^k]$  – начальное значение фазовой координаты и конечная область, в которую требуется перевести объект;  $N$  – число шагов на временном интервале управления  $[t_0; t_K]$ ;  $\delta t$  – временной

шаг дискретизации. Массив исходных данных (реквизитов) для численного решения задачи (4.6) – (4.9) имеет вид

$$R = (a, b, u_{\text{н}}, u_{\text{в}}, z^0, z_{\text{н}}^{\text{к}}, z_{\text{в}}^{\text{к}}, t_0, t_{\text{к}}, \delta t, \sigma_w, \sigma_v). \quad (4.19)$$

Следует заметить, что в сформулированной задаче энергосберегающего управления ограничения на управляющее воздействие, задаваемые формулой (4.8), симметричны, т.е.  $|u_{\text{н}}| = u_{\text{в}}$ . Данный тип задач наиболее часто применяется при управлении движущимися объектами, а случай с несимметричными ограничениями, как правило, рассматривается для стационарных объектов [37].

Применительно к задаче (4.6) – (4.9) вектор синтезирующих переменных имеет вид

$$\Lambda = (L_i, A_i)^{\text{T}}, \quad i = \overline{1, N},$$

где

$$L_i = 4 \frac{z^{\text{к}} - y_i e^{a\tau}}{b(u_{\text{в}} - u_{\text{н}})\tau} - 2 \frac{(u_{\text{в}} + u_{\text{н}})(e^{a\tau} - 1)}{a((u_{\text{в}} - u_{\text{н}})\tau)}, \quad A_i = \frac{a\tau}{2},$$

$$\tau = t_{\text{к}} - (t_0 + i\delta t), \quad z^{\text{к}} = z_{\text{н}}^{\text{к}} + \frac{|z_{\text{в}}^{\text{к}} - z_{\text{н}}^{\text{к}}|}{2}.$$

Область значений вектора  $\Lambda$ , для которых задача (4.6) – (4.9) имеет решение при функции управления  $u_i$ , называется областью существования решения энергосберегающего управления. В области существования решения энергосберегающего управления можно выделить три зоны:  $k_j, j = \overline{1, 3}$ , где

$$k_1: \frac{(1 - e^{2a\tau})}{a\tau} \leq L_i \leq \frac{(e^{2a\tau} - 1)}{a\tau}, \quad (4.20)$$

$$k_2: \frac{(e^{2a\tau} - 1)}{a\tau} \leq L_i \leq \frac{2(e^{a\tau} - 1)}{a\tau}, \quad (4.21)$$

$$k_3: \frac{2(1 - e^{a\tau})}{a\tau} \leq L_i \leq \frac{(1 - e^{2a\tau})}{a\tau}. \quad (4.22)$$

Управляющие воздействия, соответствующие зонам  $k_j$ , рассчитываются по следующим формулам:

$$\text{для } k_1 : u_i^* = u_0 + \frac{a(u_B - u_H)\tau}{2(e^{a\tau} - e^{-a\tau})} L_i, \quad u_0 = \frac{u_B + u_H}{2}, \quad (4.23)$$

$$\text{для } k_2 : u_i^* = u_0 + \frac{1}{2} \left\{ \left[ \frac{a\tau}{2} L_i + 1 \right] e^{-a\tau} \pm \sqrt{\left( \frac{a\tau}{2} L_i + 1 \right)^2 e^{-2a\tau} - 1} \right\}, \quad (4.24)$$

для  $k_3$  :

$$u_i^* = u_0 + \frac{(u_B - u_H)}{2} \left\{ \left[ \frac{a\tau}{2} L_i - 1 \right] e^{-a\tau} \pm \sqrt{\left( \frac{a\tau}{2} L_i - 1 \right)^2 e^{-2a\tau} - 1} \right\}. \quad (4.25)$$

Следует заметить, что из-за влияния ДФ по каналам управления и измерения вектор синтезирующих переменных может переходить из одной зоны в другую (при этом синтезирующая функция меняет вид) или может выходить за границы области существования решения задачи энергосберегающего управления. Предложенный расширенный полный анализ позволяет учесть влияние ДФ при решении задач оптимального управления.

## 4.2. РЕЖИМ «ПРОЦЕСС» НА МСФ

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.

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  $i$ -й камеры от требуемых регламентом значений влажности  $\bar{y}_i$ . Вектор выходных переменных для контролируемых  $n$ -й и  $(n+1)$ -й камер сушильной установки имеет вид:  $y = (\varphi_{i=n}, \varphi_{i+1=n+1}, m(\varphi_k^k))$ . Множество  $\mathcal{H}$  задают в виде морфологической таблицы, элемент  $h_l(\cdot) \in \mathcal{H}$  этой таблицы имеет три компоненты:  $h_l(\cdot) = (h_{li}, h_{li+1}, h_{lk})$ , две из которых  $h_{li}, h_{li+1}$  принимают одно из пяти возможных значений, а компонента  $h_{lk}$  – одно из трех:

$$h_{li} = \begin{cases} h_{li}^{\text{ННД}}, & \text{если } y_i < (\bar{y}_i - \delta_i^{(2)}), \\ h_{li}^{\text{НД}}, & \text{если } y_i \in [\bar{y}_i - \delta_i^{(2)}, \bar{y}_i - \delta_i^{(1)}), \\ h_{li}^{\text{Д}}, & \text{если } y_i \in [\bar{y}_i - \delta_i^{(1)}, \bar{y}_i + \delta_i^{(1)}], \\ h_{li}^{\text{ВД}}, & \text{если } y_i \in (\bar{y}_i + \delta_i^{(1)}, \bar{y}_i + \delta_i^{(2)}], \\ h_{li}^{\text{НВД}}, & \text{если } y_i > (\bar{y}_i + \delta_i^{(2)}) \quad i = n, n + 1; \end{cases}$$

$$h_{lk} = \begin{cases} h_{lk}^{\text{Н}}, & \text{если } y_k < 0,65, \\ h_{lk}^{\text{СР}}, & \text{если } y_k \in [0,65; 0,8], \\ h_{lk}^{\text{В}}, & \text{если } y_k > 0,8, \end{cases} \quad (4.26)$$

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.

Таким образом, множество  $\mathcal{H}$  содержит  $N = 75$  состояний функционирования (см. табл. 4.1). В ней по строкам приведены значения  $h'_{li}$  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.

Аналогично строится таблица для состояний функционирования  $h_l^k(\cdot) = (h_{li}^k, h_{li+1}^k, h_{lk}^k)$ , идентифицируемых по значениям влажности материала на выходе сразу двух камер ( $i$ -й и  $(i+1)$ -й), описываемых вектором  $y^k = (\varphi_{n=i}^k, \varphi_{n+1=i+1}^k, m(\varphi_k^k))$ .

Заметим, что мера доверия к достижению требуемого качества продукции на выходе сушильной установки определяется для материала, находящегося в фиксированный момент времени  $t$  в  $(i+1)$ -й камере (см. табл. 4.2).

Проведя анализ данных таблиц, выделим следующие классы, соответствующие различным алгоритмам управления, на множестве состояний функционирования.

**4.1 Множество состояний функционирования  $\mathcal{H}$   
для фиксированного момента времени**

Состояние $h'_i(\cdot) \vee h_i(\cdot)$	Состояния элементов множества $\mathcal{H}$		
	$h_{ii}(t)$	$h_{i+1}(t)$	$h_{ik}(t)$
$h'_1(\cdot) \vee h_1(\cdot)$	$h_{1,n}^{\text{HND}}$	$h_{1,n+1}^{\text{HND}}$	$h_{1,k}^{\text{M}}$
$h'_2(\cdot) \vee h_2(\cdot)$	$h_{2,n}^{\text{HD}}$	$h_{2,n+1}^{\text{HND}}$	$h_{2,k}^{\text{M}}$
$h'_3(\cdot) \vee h_3(\cdot)$	$h_{3,n}^{\text{D}}$	$h_{3,n+1}^{\text{HND}}$	$h_{3,k}^{\text{M}}$
$h'_4(\cdot) \vee h_4(\cdot)$	$h_{4,n}^{\text{ВД}}$	$h_{4,n+1}^{\text{HND}}$	$h_{4,k}^{\text{M}}$
$h'_5(\cdot) \vee h_5(\cdot)$	$h_{5,n}^{\text{HВД}}$	$h_{5,n+1}^{\text{HND}}$	$h_{5,k}^{\text{M}}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$h'_{71}(\cdot) \vee h_{71}(\cdot)$	$h_{71,n}^{\text{HND}}$	$h_{71,n+1}^{\text{HВД}}$	$h_{71,k}^{\text{B}}$
$h'_{72}(\cdot) \vee h_{72}(\cdot)$	$h_{72,n}^{\text{HD}}$	$h_{72,n+1}^{\text{HВД}}$	$h_{72,k}^{\text{B}}$
$h'_{73}(\cdot) \vee h_{73}(\cdot)$	$h_{73,n}^{\text{D}}$	$h_{73,n+1}^{\text{HВД}}$	$h_{73,k}^{\text{B}}$
$h'_{74}(\cdot) \vee h_{74}(\cdot)$	$h_{74,n}^{\text{ВД}}$	$h_{74,n+1}^{\text{HВД}}$	$h_{74,k}^{\text{B}}$
$h'_{75}(\cdot) \vee h_{75}(\cdot)$	$h_{75,n}^{\text{HВД}}$	$h_{75,n+1}^{\text{HВД}}$	$h_{75,k}^{\text{B}}$

**4.2. Множество состояний функционирования  $\mathcal{H}$   
для различных моментов времени**

Состояние $h_i(\cdot)$	Состояния элементов множества $\mathcal{H}$		
	$h_{ii}(t)$	$h_{i+1}(t)$	$h_{ik}(t)$
$h_1(\cdot)$	$h_{1,n}^{\text{HND}}$	$h_{1,n+1}^{\text{HND}}$	$h_{1,k}^{\text{M}}$
$h_2(\cdot)$	$h_{2,n}^{\text{HD}}$	$h_{2,n+1}^{\text{HND}}$	$h_{2,k}^{\text{M}}$
$h_3(\cdot)$	$h_{3,n}^{\text{D}}$	$h_{3,n+1}^{\text{HND}}$	$h_{3,k}^{\text{M}}$
$h_4(\cdot)$	$h_{4,n}^{\text{ВД}}$	$h_{4,n+1}^{\text{HND}}$	$h_{4,k}^{\text{M}}$
$h_5(\cdot)$	$h_{5,n}^{\text{HВД}}$	$h_{5,n+1}^{\text{HND}}$	$h_{5,k}^{\text{M}}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Состояние $h_i(\cdot)$	Состояния элементов множества $\mathcal{H}$		
	$h_{ii}(t)$	$h_{i+1}(t)$	$h_{ik}(t)$
$h_{71}(\cdot)$	$h_{71,n}^{\text{HHD}}$	$h_{71,n+1}^{\text{HBD}}$	$h_{71,k}^{\text{B}}$
$h_{72}(\cdot)$	$h_{72,n}^{\text{HD}}$	$h_{72,n+1}^{\text{HBD}}$	$h_{72,k}^{\text{B}}$
$h_{73}(\cdot)$	$h_{73,n}^{\text{D}}$	$h_{73,n+1}^{\text{HBD}}$	$h_{73,k}^{\text{B}}$
$h_{74}(\cdot)$	$h_{74,n}^{\text{BD}}$	$h_{74,n+1}^{\text{HBD}}$	$h_{74,k}^{\text{B}}$
$h_{75}(\cdot)$	$h_{75,n}^{\text{HBD}}$	$h_{75,n+1}^{\text{HBD}}$	$h_{75,k}^{\text{B}}$

I. Класс ситуаций  $K_0$ , характеризующийся тем, что значения влажности материала в контролируемых камерах принадлежат допустимому диапазону:

$$\left(\varphi_n \in Y_n^{\text{доп}}\right) \wedge \left(\varphi_{n+1} \in Y_{n+1}^{\text{доп}}\right). \quad (4.27)$$

Класс ситуаций  $K_0$  содержит ситуации:

$$K_0 = \{h_{28}(\cdot), h_{33}(\cdot), h_{36}(\cdot), h_{37}(\cdot), h_{38}(\cdot), h_{53}(\cdot), h_{58}(\cdot), h_{61}(\cdot), h_{62}(\cdot), h_{63}(\cdot), h'_{28}(\cdot), h'_{33}(\cdot), h'_{36}(\cdot), h'_{37}(\cdot), h'_{38}(\cdot)\}. \quad (4.28)$$

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:

$$K_{\text{Пр}} = \{h_{26}(\cdot), h_{27}(\cdot), h_{31}(\cdot), h_{32}(\cdot), h_{51}(\cdot), h_{52}(\cdot), h_{56}(\cdot), h_{57}(\cdot), h'_{26}(\cdot), h'_{27}(\cdot), h'_{31}(\cdot), h'_{32}(\cdot)\}. \quad (4.29)$$

III. Класс ситуаций  $K_n$ , характеризующийся тем, что значения влажности материала в  $n$ -й камере выходят за допустимые пределы, а в  $(n+1)$ -й камере – принадлежат допустимому диапазону:

$$\left(y_n > \bar{y}_n + \delta_n^{(1)}\right) \wedge \left(y_{n+1} < \bar{y}_{n+1} + \delta_{n+1}^{(1)}\right). \quad (4.30)$$

Класс  $K_n$  состоит из следующих ситуаций:

$$K_n = \{h_{39}(\cdot), h_{40}(\cdot), h_{64}(\cdot), h_{65}(\cdot), h'_{14}(\cdot), h'_{15}(\cdot)\}. \quad (4.31)$$

IV. Класс ситуаций  $K_{n+1}$ , характеризующийся тем, что значения влажности материала в  $n$ -й камере принадлежат допустимому диапазону, а в  $(n+1)$ -й камере – выходят за допустимые пределы:

$$\left(y_{n+1} > \bar{y}_{n+1} + \delta_{n+1}^{(1)}\right) \wedge \left(y_n < \bar{y}_n + \delta_n^{(1)}\right). \quad (4.32)$$

Класс  $K_{n+1}$  состоит из следующих ситуаций:

$$K_{n+1} = \{h_{18}(\cdot), h_{23}(\cdot), h'_{43}(\cdot), h'_{48}(\cdot)\}. \quad (4.33)$$

V. Класс ситуаций  $K_{n,n+1}$ , характеризующийся тем, что значения влажности материала в обеих контролируемых камерах выходят за допустимые пределы:

$$\left(y_n > \bar{y}_n + \delta_n^{(1)}\right) \wedge \left(y_{n+1} > \bar{y}_{n+1} + \delta_{n+1}^{(1)}\right). \quad (4.34)$$

Класс  $K_{n,n+1}$  состоит из наибольшего количества ситуаций:

$$\begin{aligned} K_{n,n+1} = \{ & h_{16}(\cdot), h_{17}(\cdot), h_{19}(\cdot), h_{20}(\cdot), h_{21}(\cdot), h_{22}(\cdot), h_{24}(\cdot), h_{25}(\cdot), h_{29}(\cdot), \\ & h_{30}(\cdot), h_{34}(\cdot), h_{35}(\cdot), h_{54}(\cdot), h_{55}(\cdot), h_{59}(\cdot), h_{60}(\cdot), h'_4(\cdot), h'_5(\cdot), h'_6(\cdot), \\ & h'_{10}(\cdot), h'_{19}(\cdot), h'_{20}(\cdot), h'_{24}(\cdot), h'_{25}(\cdot), h'_{41}(\cdot), h'_{42}(\cdot), h'_{46}(\cdot), h'_{47}(\cdot)\}. \end{aligned} \quad (4.35)$$

Важное значение при эффективном функционировании 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  $K_0$  и  $K_{\text{Пр}}$ . Для других классов

ситуаций в целях обеспечения требуемого качества выпускаемого продукта необходимо вырабатывать соответствующее корректирующее управляющее воздействие.

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  $\varphi_n$  и  $\varphi_{n+1}$ , с использованием интеллектуального датчика; мера доверия к требуемой конечной влажности материала, рассчитанная по процедурной модели  $m(\varphi_k^k) = \text{Алг}_{\text{ДШ}}(\varphi_n, \varphi_{n+1}, \varepsilon)$  методом Демпстера–Шафера, где  $\varepsilon$  – 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 [38].



## 5. СТРАТЕГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Для решения сформулированных задач необходимо разработать алгоритмическое и методологическое обеспечение ИИУС ТТА, которое составляет основу функциональных программных модулей и позволяет достигать поставленные цели. В разделе рассматриваются алгоритмы синтеза управляющих воздействий в различных режимах работы ТТА с учетом действующих дестабилизирующих факторов в каналах управления и измерения.

### 5.1. РАСШИРЕННЫЕ СТРАТЕГИИ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ НАЛИЧИЯ ДФ В КАНАЛАХ УПРАВЛЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ РЕЖИМА «ПУСК»

Алгоритмы синтеза управляющих воздействий зависят от стратегии реализации оптимального управляющего воздействия. Наряду с основными алгоритмами, не учитывающими влияние ДФ, реализующими программную  $S_{пр}$  и позиционную  $S_{пз}$  стратегии, ИИУС ТТА использует алгоритмы, реализующие расширенные стратегии управления с учетом ДФ, действующих по каналам управления и измерения, такие как: с фильтром Калмана ( $S_{ФК}$ ); с прогнозирующей моделью ( $S_{ПМ}$ ).

Наиболее часто рассматриваются три модели системы оптимального управления при наличии помех. Эти модели различаются наличием или отсутствием помех в каналах управления и измерения. В первом случае присутствуют помехи в канале измерения:

$$M_1 : \begin{cases} x_{i+1} = Fx_i + Gu_i^* + \varphi_i, i = \overline{0, N-1}; \\ y_i = Hx_i + v_i; \\ u_i^* = L_i(R_{1q}) y_i. \end{cases} \quad (5.1)$$

Во втором случае – помехи в канале управления:

$$M_2 : \begin{cases} x_{i+1} = Fx_i + Gu_i^* + \varphi_i, i = \overline{0, N-1}; \\ y_i = Hx_i; \\ u_i^* = L_i(R_{1q}) y_i + w_i. \end{cases} \quad (5.2)$$

В третьем – помехи в каналах измерения и управления:

$$M_3 : \begin{cases} x_{i+1} = Fx_i + Gu_i^* + \varphi_i, i = \overline{0, N-1}; \\ y_i = Hx_i + v_i; \\ u_i^* = L_i(R_{1q})y_i + w_i. \end{cases} \quad (5.3)$$

В общем виде математическую постановку задачи оптимального управления при наличии помех можно представить в следующем виде (4.6) – (4.9).

Массивы реквизитов в моделях содержат следующие составляющие исходных данных:

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_1 &= \{R_{1q} = (F, G, H, x^0, \chi^k, u_n, u_b, \delta t, N, D_\varphi, D_v)_q\}, \\ \mathfrak{R}_2 &= \{R_{2q} = (F, G, H, x^0, \chi^k, u_n, u_b, \delta t, N, D_\varphi, D_w)_q\}, \\ \mathfrak{R}_3 &= \{R_{3q} = (F, G, H, x^0, \chi^k, u_n, u_b, \delta t, N, D_\varphi, D_w, D_v)_q\}. \end{aligned}$$

Целью управления является перевод объекта из начального состояния  $x_0$  в конечную область  $\chi^k$  при ограничениях на управление за фиксированный временной интервал с минимумом затрат энергии.

Можно сформулировать задачу проектирования системы энерго-сберегающего управления, она заключается в выборе такого алгоритма управления, при котором для заданного вида модели достигается цель управления и обеспечивается наибольшая экономия энергозатрат.

Рассмотрим алгоритмы оптимального управления при наличии помех в канале измерения, т.е. для вида модели  $M_1$ .

При позиционной стратегии оптимальное управление на каждом шаге рассчитывается в зависимости от текущего значения выходной переменной  $y_i$ , остаточного числа шагов  $N-i$  и значений массива реквизитов, алгоритм расчета задается синтезирующей функцией  $S$

$$u_i^* = S(y_i, N-i, R). \quad (5.4)$$

Например, в частном случае, для модели первого порядка  $S$  может иметь следующий вид:

$$u_i^* = \frac{2ay_i}{b(e^{-2a(\Delta t - i\delta t)} - 1)}. \quad (5.5)$$

Для снижения влияния помех вместо  $y_i$  в алгоритм (5.4) подставляется оценка вектора фазовых координат  $\hat{x}_i$ , получаемая при использовании фильтра Калмана

$$\hat{u}_i^* = S(\hat{x}_i, N - i, R). \quad (5.6)$$

Стратегия управления с использованием данного алгоритма называется позиционной с оптимальной фильтрацией.

На основании рассмотренных алгоритмов был разработан программный модуль имитационного моделирования работы системы энергосберегающего управления. С помощью разработанного модуля было проведено моделирование работы системы энергосберегающего управления для объекта первого порядка при различных интенсивностях помех, действующих на объект и измерительное устройство в целях сравнения алгоритмов управления. По полученным данным были построены графики зависимости экономии энергии от числа шагов и интенсивностей помех (рис. 5.1, 5.2).

Рассмотрим алгоритм оптимального управления при наличии помех в канале управления, т.е. для вида модели  $M_2$ .

В простейшем случае помеху в канале управления  $w_i$  можно представить в виде двух составляющих

$$w_i = \rho_1 w_{i-1} + \beta_i, \quad i = 0, N - 1. \quad (5.7)$$

Здесь  $\rho_1 w_{i-1}$  – коррелированная составляющая,  $\beta_i$  – «белая» составляющая.

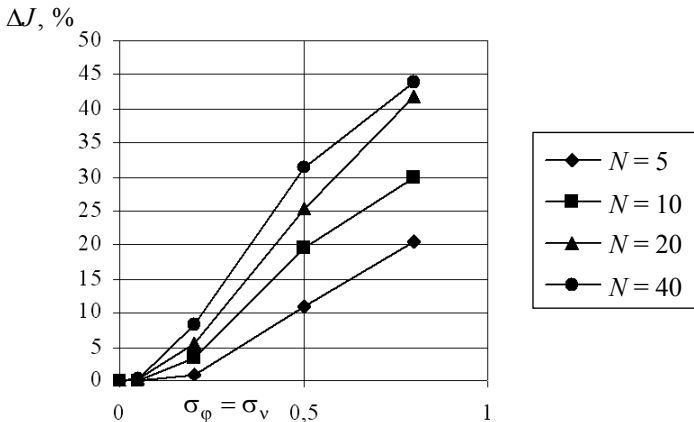
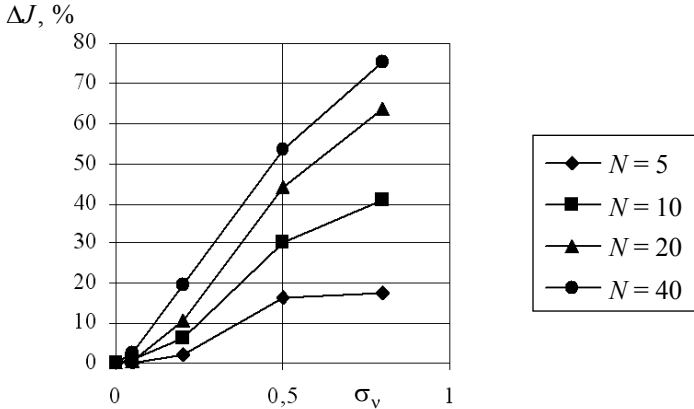


Рис. 5.1. График зависимости экономии энергии от числа шагов и величины помех (интенсивности помех равны)



**Рис. 5.2.** График зависимости экономии энергии от числа шагов и величины помехи в канале измерения

Для снижения влияния возмущения  $w_i$  введем компенсационную добавку  $\tilde{w}_i$ , определенную путем оптимального линейного прогноза в простейшем случае по формуле

$$\tilde{w}_i = \bar{w} + \phi_1(w_{i-1} - \bar{w}). \quad (5.8)$$

Управляющее воздействие с учетом прогноза возмущения будет иметь следующий вид:

$$\tilde{u}_i^* = L_i y_i + w_i - \tilde{w}_i. \quad (5.9)$$

Прогнозирующая модель (5.8) выбирается с учетом требуемой точности прогнозирования и возможности ее использования простым управляющим устройством. При необходимости для увеличения точности прогноза могут применяться более сложные модели, например, авторегрессии второго порядка, скользящего среднего, авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего или другие. Необходимо учитывать, что эффективная работа системы зависит от выбранного шага квантования и среднеквадратичного отклонения  $w_i$ . Окончательный выбор модели прогноза производится на основе имитации работы системы с различными параметрами.

Для исследования влияния помех и эффективности предложенного алгоритма управления был разработан программный модуль моделирования работы системы при наличии помех в канале управления и проведено моделирование работы системы первого порядка.

По полученным данным были построены графики оптимального управления и зависимости экономии энергии от коэффициента корреляции «цветного шума» (рис. 5.3, 5.4).

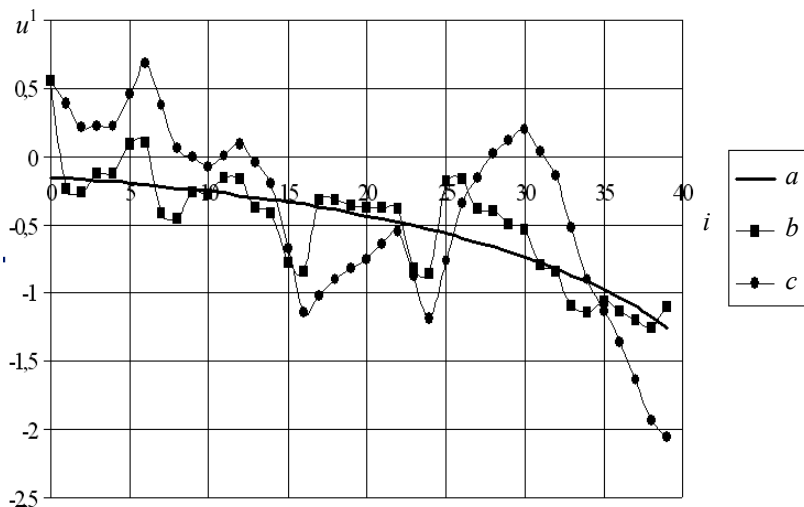


Рис. 5.3. Графики оптимального управления при  $N = 40$ :  $a$  – программное;  $b$  – с прогнозом возмущения;  $c$  – без прогноза возмущения

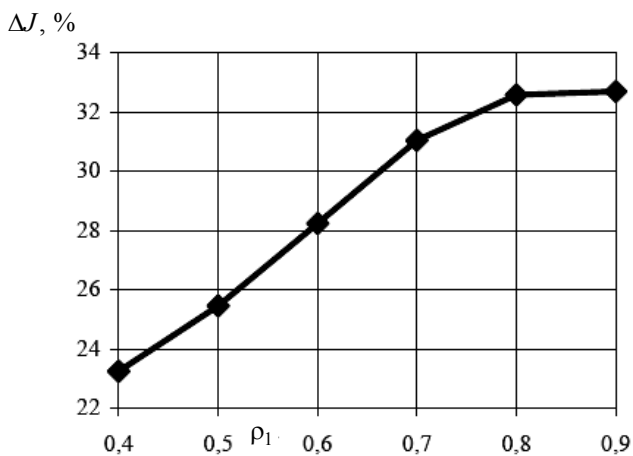


Рис. 5.4. Зависимость экономии энергии  $\Delta J$  от коэффициента корреляции «цветного» шума в канале управления

Алгоритм управления для вида модели  $M_3$  представляет собой сочетание алгоритмов для моделей  $M_1$  и  $M_2$ , и все выводы, сделанные для этих моделей, справедливы и для модели  $M_3$

$$u_i^* = L_i \hat{x}_i + w_i - \tilde{w}_i. \quad (5.10)$$

Рассмотренные алгоритмы управления являются решениями задачи проектирования ИИУС ТТА, так как они позволяют для заданного вида модели достичь цели управления с минимумом энергозатрат.

## 5.2. МЕТОДИКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МСФ РЕЖИМА «ПУСК» ПРИ РЕАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИИУС ТТА, БЕЗ ЛИЦА, ПРИНИМАЮЩЕГО РЕШЕНИЕ

Рассмотрим интеллектуальный синтез оптимального управления на МСФ в режиме «ПУСК».

**Определение 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 производится по результатам расширенного 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  $\theta$ , т.е.

$$r_h = (a_h, b_h, \theta, t_{kh}, z_{\theta h}, z_{kh}, u_{wh}, u_{bh});$$

2) с использованием массива реквизитов  $r_h$  рассчитываются реквизиты нормированной задачи управления и значения синтезирующих переменных  $L, A$ ;

3) 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, 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  $\Delta t_c$ . 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  $u_h^*(t)$ . 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».

### 5.3. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

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.

Основным этапом создания алгоритмического обеспечения ИИУС ТТА процесса сушки является определение лингвистических переменных. В качестве входных рассматриваются:  $\Phi_n$  – «влажность пастообразного материала на выходе  $n$ -й камеры»,  $\Phi_{n+1}$  – «влажность пастообразного материала на выходе  $(n+1)$ -й камеры» и  $M_k^k$  – оценки меры доверия достижения требуемой влажности исследуемого пастообразного материала на выходе ТТА. Определяемой выходной переменной является  $U^{cl}$  – требуемое значение, на которое следует изменить скорость движения ленты. Условимся обозначать термы входных переменных следующим образом:

$$\Phi_n, \Phi_{n+1} = \{\text{ННД, НД, Д, ВД, НВД}\}; M_k^k = \{\text{М, СР, В}\}$$

(см. табл. 5.1 – 5.3).

Здесь (см. [19]) 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. 5.5).

### 5.1. Влажность материала на выходе $n$ камеры

№ терма	Условные обозначения термов переменной $\Phi_n$	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	$0/47,5 + 1/52,5 + 1/100$

### 5.2. Влажность материала на выходе $(n + 1)$ -й камеры

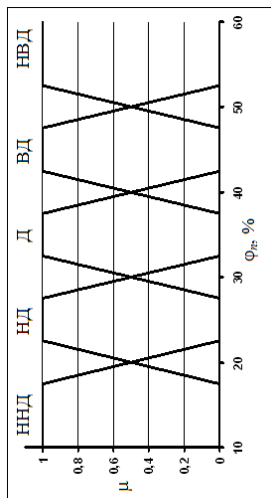
№ терма	Условные обозначения термов переменной $\Phi_{n+1}$	Функции принадлежности термов
1	ННД	$1/0 + 1/5 + 0/7$
2	НД	$0/5 + 1/7 + 1/9 + 0/11$
3	Д	$0/9 + 1/11 + 1/13 + 0/15$
4	ВД	$0/13 + 1/15 + 1/17 + 0/19$
5	НВД	$0/17 + 1/19 + 1/100$

### 5.3. Мера доверия к влажности материала на выходе сушилки

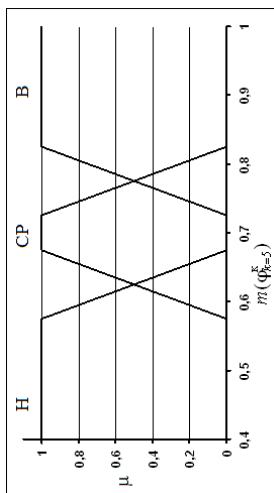
№ терма	Условные обозначения термов переменной $M_k^k$	Функции принадлежности термов
1	Н	$1/0 + 1/0,575 + 0/0,675$
2	СР	$0/0,575 + 1/0,675 + 1/0,725 + 0/0,825$
3	В	$0/0,725 + 1/0,825 + 1/1$

Здесь (см. [19]) 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. 5.5).

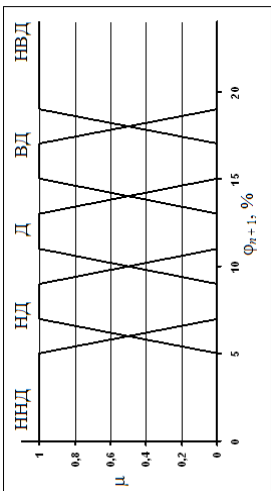




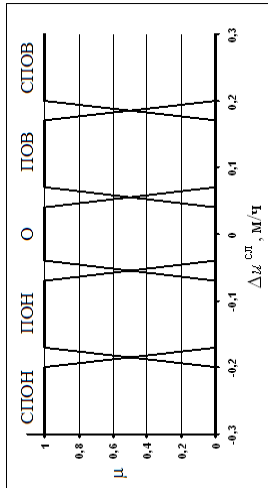
а)



б)



в)



г)

**Рис. 5.5. Функции принадлежности термов лингвистической переменной:**

а –  $\Phi_n$  (влажность пастообразного материала на выходе  $n$ -й камеры); б –  $\Phi_{n+1}$  (влажность пастообразного материала на выходе  $(n + 1)$ -й камеры); в –  $M_k^k$  (мера доверия к достижению требуемой влажности материала на выходе ТГА);

г –  $\Delta U^{сп}$  (значение, на которое необходимо изменить скорость движения ленты)

#### 5.4. Изменение скорости движения ленты

№ терма	Условные обозначения термов переменной $U^{cl}$	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	$0/0,17 + 1/0,2 + 1/0,3$

В таблице 5.4 представлены функции принадлежности выходной переменной  $U^{cl}$ , 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.  $U^{cl} = \{\text{СПОН, ПОН, О, ПОВ, СПОВ}\}$ . Функции принадлежности термов лингвистических переменных приведены на рис. 5.6,  $a - z$  [19].

Возможные алгоритмы управления, представляющие собой системы продукционных правил, определяются, учитывая множество  $\mathcal{H}$  изменения траекторий (см. табл. 4.1, 4.2), выбранные классы возможных ситуаций  $K_{пр}, K_n, K_{n+1}, K_{n, n+1}$  и вышеописанные лингвистические переменные. Приведем алгоритмы синтеза управляющих воздействий при работе ИИУС ТГА в режиме «ПРОЦЕСС».

В момент времени  $t$  для расчета управляющих воздействий используется следующая информация. Значения влажности материала в  $n$ -й и  $(n+1)$ -й камерах, определенные с использованием интеллектуального датчика влажности пастообразного материала по аналитическим моделям



значения температуры и влажности окружающего воздуха; при этом индекс  $o$  обозначает влияние факторов, этим индексом обозначенных, на все камеры сушильной установки;  $\overline{u_n^{взо}}, \overline{u_n^{сп}}, \overline{u_{n+1}^{взо}}, \overline{u_{n+1}^{сп}}$  – нормализованные значения управления воздухозаборными окнами и сбросными шиберами;  $\overline{x_n^{тса}}, \overline{x_n^{вса}}, \overline{x_{n+1}^{тса}}, \overline{x_{n+1}^{вса}}$  – нормализованные значения температуры и влажности сушильного агента в  $n$ -й и  $(n+1)$ -й камерах соответственно. Значения влажности материала  $\varphi_n$  и  $\varphi_{n+1}$  в контролируемых  $n$ -й и  $(n+1)$ -й камерах получают, денормализовав значения  $\overline{\varphi_n}$  и  $\overline{\varphi_{n+1}}$ .

Мера доверия к требуемой влажности пастообразного материала на выходе  $m(\varphi_k^k)$  рассчитывается по процедурной модели (3.33).

При этом на предыдущем шаге определяются значения компонент вектора управляющих воздействий  $u(t - \Delta t)$ .

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

$$H = \{h_n(\cdot) = (\varphi_n^{(n)}, m^{(n)}(\varphi_k^k)), h_{n+1}(\cdot) = (\varphi_n^{(n+1)}, \varphi_{n+1}^{(n+1)}, m^{(n+1)}(\varphi_k^k)), \\ h_{n+2}(\cdot) = (\varphi_n^{(n+2)}, \varphi_n^{(n+2)}, m^{(n+2)}(\varphi_k^k))\},$$

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  $K_o$ , то сохраняется режим работы с выбранным на предыдущем шаге управлением  $u(t - \Delta t)$ .

Если же каждый элемент множества  $H$  принадлежит классу  $K_{пр}$ , то в этом случае следует решить задачу повышения производительности ТГА при ограничении на качество конечного материала.

Когда компонент  $h_n(\cdot)$  множества  $H$  принадлежит классу  $K_n$ , решается задача управления режимом только для  $n$ -й камеры.

В том случае, когда компонент  $h_{n+1}(\cdot) \in K_{n+1}$ , необходимо решить задачу управления режимом для  $(n + 1)$ -й камеры.

При выполнении условия (4.34), когда ситуация принадлежит классу  $K_{n,n+1}$ , решаются задачи управления режимами одновременно для двух камер.

При решении задачи повышения производительности ТГА при ограничении на качество конечной продукции для класса ситуаций  $K_{пр}$  применяется следующий алгоритм синтеза управляющего воздействия.

I. Производится фаззификация входных лингвистических переменных – влажностей материала в  $n$ -й и  $(n + 1)$ -й камерах  $\Phi_n$ ,  $\Phi_{n+1}$  и меры доверия  $M_k^k$  к достижению требуемой влажности на выходе ТГА, в частности, определяются значения функций принадлежности термов указанных лингвистических переменных.

II. Производится нечеткий вывод с использованием следующих продукционных правил, составленных на основе табл. 5.1 – 5.4:

Правило 1: IF « $\Phi_n = \text{ННД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ННД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОВ}$ »;

Правило 2: IF « $\Phi_n = \text{ННД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОВ}$ »;

Правило 3: IF « $\Phi_n = \text{НД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ННД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОВ}$ »;

Правило 4: IF « $\Phi_2 = \text{НД}$ » and « $\Phi_3 = \text{НД}$ » and « $M_5^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОВ}$ »;

Правило 5: IF « $\Phi_n = \text{ННД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ННД}$ » and « $M_k^k = \text{В}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОВ}$ »;

Правило 6: IF « $\Phi_n = \text{ННД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НД}$ » and « $M_k^k = \text{В}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОВ}$ »;

Правило 7: IF « $\Phi_n = \text{НД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ННД}$ » and « $M_k^k = \text{В}$ », then « $U^{\text{СЛ}} = \text{СПОВ}$ »;

Правило 8: IF « $\Phi_n = \text{НД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НД}$ » and « $M_k^k = \text{В}$ », then « $U^{\text{СЛ}} = \text{СПОВ}$ ».

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  $(\Delta u_o^{\text{СЛ}})^*$ , при котором функционал

$$J = c_1(a_0 + a_1 \tilde{u}_o^{\text{СЛ}}) + c_2(b_0 + b_1(\tilde{u}_o^{\text{СЛ}})^2) \rightarrow \min_{u_o^{\text{СЛ}} \in U_{\text{доп}}^{\text{СЛ}}}, \quad (5.13)$$

и учитывает потери от снижения качества конечной продукции и производительности ТТА.

При попадании ситуации в класс  $K_n$ , также решается задача оптимизации режимов сушки. Порядок решения следующий.

I. Производится фаззификация входной переменной  $\Phi_n^k$ , задающей влажность материала в  $n$ -й камере по модели (5.11).

II. Производится нечеткий вывод по следующим продукционным правилам:

Правило 1: IF « $\Phi_n^k = \text{ВД}$ », then « $U^{\text{СЛ}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 2: IF « $\Phi_n^k = \text{НВД}$ », then « $U^{\text{СЛ}} = \text{СПОН}$ ».

Последующие шаги аналогичны шагам III, IV, V вышеописанного алгоритма.

В случае принадлежности ситуации классу  $K_{n+1}$ , решаем задачу определения влажности в  $(n + 1)$ -й камере. Здесь по моделям (5.11), (5.12) производится фаззификация лингвистических переменных  $\Phi_{n+1}$ ,  $M_k^K$ , соответственно, и определяются значения функций принадлежности термов этих переменных.

Затем для нечеткого вывода используются следующие продукционные правила:

Правило 1: IF « $\Phi_{n+1} = \text{ВД}$ » and « $M_k^K = \text{М}$ », then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 2: IF « $\Phi_{n+1} = \text{НВД}$ » and « $M_k^K = \text{М}$ », then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 3: IF « $\Phi_{n+1} = \text{ВД}$ » and « $M_k^K = \text{СР}$ », then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 4: IF « $\Phi_{n+1} = \text{НВД}$ » and « $M_k^K = \text{СР}$ », then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ ».

Дальнейшие действия аналогичны шагам III, IV, V первого алгоритма.

Когда ситуация принадлежит классу  $K_{n,n+1}$ , тогда синтезируются управляющие воздействия, учитывающие отклонения влажности материала в двух камерах одновременно. При этом следует произвести следующие шаги:

I. Фаззификация входных переменных  $\Phi_n$ ,  $\Phi_{n+1}$ ,  $M_k^K$  и определение значений функций принадлежности их термов.

II. Нечеткий вывод по следующим продукционным правилам:

Правило 1: IF « $\Phi_n = \text{НВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ВД}$ » and « $M_k^K = \text{М}$ », then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 2: IF « $\Phi_n = \text{НД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ВД}$ » and « $M_k^K = \text{М}$ », then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 3: IF « $\Phi_n = \text{ВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ВД}$ » and « $M_k^K = \text{М}$ », then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 4: IF « $\Phi_n = \text{НВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ВД}$ » and « $M_k^K = \text{М}$ », then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 5: IF « $\Phi_n = \text{ННД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НВД}$ » and « $M_k^k = \text{М}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 6: IF « $\Phi_n = \text{НД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НВД}$ » and « $M_k^k = \text{М}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 7: IF « $\Phi_n = \text{НД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ВД}$ » and « $M_k^k = \text{М}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 8: IF « $\Phi_n = \text{НВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НВД}$ » and « $M_k^k = \text{М}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 9: IF « $\Phi_n = \text{ВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ННД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 10: IF « $\Phi_n = \text{НВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ННД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 11: IF « $\Phi_n = \text{ВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 12: IF « $\Phi_n = \text{НВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 13: IF « $\Phi_n = \text{ВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ННД}$ » and « $M_k^k = \text{В}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{О}$ »;

Правило 14: IF « $\Phi_n = \text{НВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ННД}$ » and « $M_k^k = \text{В}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 15: IF « $\Phi_n = \text{ВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НД}$ » and « $M_k^k = \text{В}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{О}$ »;

Правило 16: IF « $\Phi_n = \text{НВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НД}$ » and « $M_k^k = \text{В}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;



Правило 17: IF « $\Phi_n = \text{ВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ННД}$ » and « $M_k^k = \text{М}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 18: IF « $\Phi_n = \text{НВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ННД}$ » and « $M_k^k = \text{М}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 19: IF « $\Phi_n = \text{ВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НД}$ » and « $M_k^k = \text{М}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 20: IF « $\Phi_n = \text{НВД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НД}$ » and « $M_k^k = \text{М}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 21: IF « $\Phi_n = \text{ННД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ВД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 22: IF « $\Phi_n = \text{НД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{ВД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{ПОН}$ »;

Правило 23: IF « $\Phi_n = \text{ННД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НВД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ »;

Правило 24: IF « $\Phi_n = \text{НД}$ » and « $\Phi_{n+1} = \text{НВД}$ » and « $M_k^k = \text{СР}$ »,  
then « $U^{\text{СП}} = \text{СПОН}$ ».

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 [19]:

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  $\varphi_n$  в  $n$ -й камере.

III. Находятся нормированный диапазон влажности (см. табл. 3.1 раздела 3) и соответствующее ему множество гипотез  $m_1(W)$ .

IV. Снимаются показания с интеллектуального датчика влажности пастообразного материала  $\varphi_{n+1}$  в  $(n+1)$ -й камере.

V. Определяется нормированный диапазон влажности (см. табл. 3.1 раздела 3) и соответствующее множество гипотез  $m_2(\mathcal{D})$ .

VI. Методом Демпстера–Шафера рассчитываются числовые оценки мер доверия достижения требуемого качества материала на выходе ТГА при используемой скорости движения пластинчатого конвейера.

VII. Производится нечеткий вывод по продукционным правилам, соответствующим идентифицированному классу ситуаций, и определяется по формуле (5.13) синтезируемое значение управляющего воздействия  $(\Delta u_o^{cl})^*$ , 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  $\varphi_n, \varphi_n^k, \varphi_{n+1}$  и  $\varphi_{n+1}^k$  по значениям возмущающих и управляющих воздействий.

#### 5.4. РАЗРАБОТКА И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИИУС ТГА НА ПРИМЕРЕ АЛГОРИТМА ПОЗИЦИОННОГО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Пусть синтезируемый регулятор решает задачу оптимального управления при ограничении на управление с закрепленными концами траектории изменения фазовых координат, при минимизируемом функционале – затраты энергии и при наличии ДФ в каналах управления и измерения

$$x_{i+1} = Fx_i + Gu_i^*, \quad y_i = Cx_i + v_i,$$

$$u_i^* = s_{Z(H)}(y_i, N - i, \mathfrak{R}) + w_i, \quad H \in \{h_1, h_2, h_3\},$$

$$J_3 = \delta t \sum_{i=0}^{N-1} u_i^2 \rightarrow \min,$$

$$\forall i \in [0, N-1], \quad u_i \in [u_H, u_B],$$

$$x_0 = x^0, \quad x_N \in \chi^k,$$

$$\bar{w} = 0, \quad E[w_i, w_j^T] = R\delta(i, j),$$

$$\bar{v} = 0, \quad E[v_i, v_j^T] = Q\delta(i, j),$$

здесь  $x_i, u_i, y_i, w_i, v_i$  – значения соответственно вектора фазовых координат, управления (скалярного), выходной переменной на  $i$ -м шаге, ДФ в каналах управления и измерения;  $F, G, C$  – матрицы соответствующих размерностей;  $J_0$  – минимизируемый функционал (затраты энергии);  $\delta t$  – временной шаг дискретизации;  $N$  – число шагов на временном интервале управления;  $u_{\text{н}}, u_{\text{в}}$  – границы изменения управляющего воздействия;  $x^0, \chi^{\text{к}}$  – начальное значение вектора  $x$  и конечная область, в которую требуется перевести объект за  $N$  шагов,  $H$  – множество состояний функционирования,  $\Pi$  – область существования решения сформулированной 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  $h_1, h_2, h_3$ .

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.

Известные стратегии – программная и позиционная – в условиях неопределенности параметров объекта имеют свои недостатки. Программная стратегия имеет более высокий эффект энергосбережения, но проигрывает позиционной в точности выхода в заданную область  $\chi^{\text{к}}$ .

При позиционной стратегии  $S_{\text{пз}}$  энергосберегающего управления  $u_i^*$  на каждом шаге рассчитывается в зависимости от текущего значения выходной переменной  $y_i$  и компонентов массива реквизитов. Алгоритм расчета задается синтезирующей функцией  $S$ , т.е.

$$u_i^* = S(y_i, R), \quad i = \overline{1, N}.$$

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 заданного 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.

Особенность позиционной стратегии управления заключается в том, что на каждом шаге требуется пересчитывать значения вектора синтезирующих переменных. При полном отсутствии ДФ, действующих на объект, траектория движения вектора  $\Lambda$  меняется плавно, и он может переходить в соседнюю зону, а также выходить из области П. 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  $\delta t$  и т.д.

Синтезирующие переменные

$$L(x, t, \mathfrak{R}) = 4 \frac{x_k - x e^{a(t_k - t)}}{b(u_B - u_H)(t_k - t)} - 2 \frac{(u_B + u_H)(e^{a(t_k - t)} - 1)}{a((u_B - u_H)(t_k - t))}$$

и

$$A(t) = \frac{a(t_k - t)}{2}$$

однозначно определяют область П. Эти переменные образуют вектор

$$\Lambda = (L(x, t, \mathfrak{R}), A(t))^T.$$

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 П;
- 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 временном интервале дискретизации.

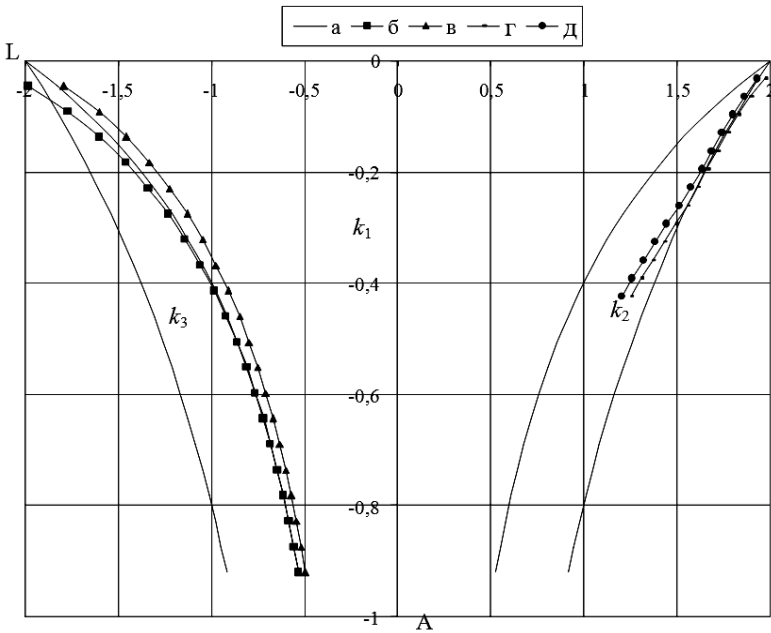
Результаты имитационного моделирования модифицированного алгоритма МСП с массивами реквизитов

$$\mathfrak{R}_1 = (-0,092; 0,1; -3; 3; 10; [0,1; 0,1]; 0; 20; 1; 0; 0)$$

$$\mathfrak{R}_2 = (-0,1306; 0,2692; 0; 350; 355; [540; 560]; 0; 6,5; 0,5; 0; 0)$$

проиллюстрированы на рис. 5.6. Здесь 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.



**Рис. 5.6. Траектории вектора синтезирующих переменных без ДФ при управлении с использованием МСП:**

*a* – 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  $t_{кор}$

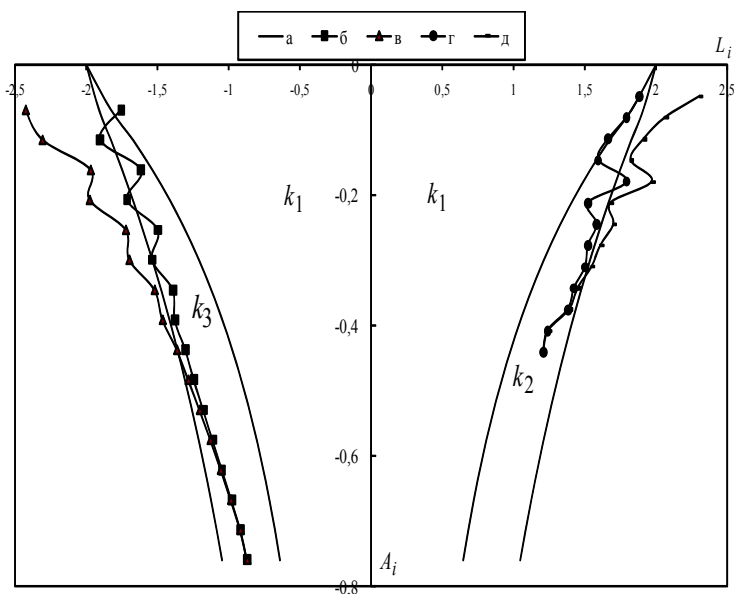
Другим возможным методом синтеза управляющего воздействия является классический алгоритм аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР). В алгоритме АКОР для расчета управляющего воздействия вне зависимости от зоны используется формула для зоны  $k_1$  (20 формула отчета 2015 года), которая в общем случае может быть сведена к известной формуле Эйлера–Лагранжа [38].

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 рисунке 5.7 показаны траектории изменения синтезирующих переменных, а также приведены границы зон и области существования решения ЗОУ.



**Рис. 5.7. Траектории вектора синтезирующих переменных с ДФР:**

*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)

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 5.5 и 5.6 приведены значения функционалов с использованием алгоритмов МСП и АКОР по выборкам в 100 опытов.

Для сравнения алгоритмов управления методик МСП и АКОР также можно использовать два скалярных критерия: минимума функционала ( $J_3 \rightarrow \min$ ) и точности достижения цели управления (минимума отклонения конечного значения фазовой координаты  $|z^k - z_N| \rightarrow \min$ ). Результаты сравнения приведены в табл. 5.7 (усредненные данные по выборке в 100 опытов).

**5.5. Таблица сравнения алгоритмов МСП и АКОР реализации управления при охлаждении**

	$t_{\text{кор}}$	$t_k$	МСП	АКОР
$J_3$	Нет	20	45,5311	45,2098
$y_N$			0,0501	0,0521
$J_3$	Да		38,4446	38,1459
$y_N$			0,1785	0,1821
$J_3$	Нет	16	100,9809	78,9955
$y_N$			0,0904	0,29138
$J_3$	Да		85,0462	70,3183
$y_N$			0,2512	0,4049

**5.6. Таблица сравнения алгоритмов МСП и АКОР  
реализации управления при нагреве**

	$t_{кор}$	$t_k$	МСП	АКОР
$J_3$	Нет	8,5	762 151,3226	748 712,0538
$y_N$			541,042117	538,874093
$J_3$	Да		743 527,3388	729 996,2257
$y_N$			536,757875	534,16244
$J_3$	Нет	6,5	692 767,954	660 580,0122
$y_N$			540,49763	534,375702
$J_3$	Да		673 771,9474	642 664,6218
$y_N$			535,402061	528,895077

**5.7. Усредненные результаты сравнения  
алгоритмов МСП и АКОР**

Массив реквизитов	Критерий	Алгоритм	
		МСП	АКОР
$R_1$	$J_3$	75,052	70,323
	$ z^k - z_N $	0,151	0,41
$R_2$	$J_3$	653 771	642 664
	$ z^k - z_N $	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 случайных возмущений по каналу управления на этапе синтеза управляющих воздействий. Их применение позволяет повысить эффективность функционирования системы управления и минимизировать затраты энергии, связанные с неточностью реализации оптимального управления.

## 5.5. МЕТОД НАСТРОЙКИ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Сформулируем задачу оптимального управления (ЗОУ) для объекта, описываемого системой дифференциальных уравнений вида  $\dot{z} = f(A, B, z, u, h, t)$ . Объект требуется перевести из начального состояния вектора фазовых координат  $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)^T$  в конечную область  $\chi^k = ([x_1^{кН}, x_1^{кВ}], [x_2^{кН}, x_2^{кВ}], \dots, [x_n^{кН}, x_n^{кВ}])$  при ограничении на управление  $u \in [u_n, u_b]$  с минимизируемым функционалом

$$J_3 = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \text{ за определенный интервал времени } \Delta t = t_k - t_0. \text{ Массив}$$

реквизитов ЗОУ имеет вид

$$\mathfrak{R} = (A, B, u_n, u_b, x^0, \chi^k, t_0, t_k).$$

В настоящее время широкое распространение получили две стратегии оптимального управления: программная (*pr*) и позиционная (*pz*). При использовании программной стратегии для выхода на заданный режим необходимо точно знать параметры модели. А при позиционной, за счет обратной связи, в большинстве случаев, заданный режим будет достигнут, но при этом могут резко увеличиваться затраты энергоресурсов.

В реальных условиях работы параметры объекта могут иметь некоторую неопределенность, например, на изменение параметров могут воздействовать неточное задание начальных условий ЗОУ или случай-

ное изменение режимов работы объекта. Каждое состояние объекта однозначно характеризуется вектором синтезирующих переменных  $\Lambda = (L_1(R), L_2(R))$ , где  $L_1(R)$ ,  $L_2(R)$  – синтезирующие переменные.

На практике траектория изменения вектора синтезирующих переменных отклоняется от расчетной. Это может происходить за счет воздействия ДФ и изменения параметров объекта. При изменении параметров объекта происходит отклонение вектора синтезирующих переменных от рассчитанного по программной стратегии. Это отклонение обозначим  $\Delta\Lambda = |\Lambda_{pr} - \Lambda_{pz}|$ . Выбор  $\Delta\Lambda$  в качестве индикатора рассогласования обусловлен двумя факторами, во-первых, по значению  $\Lambda_{pr}$  можно сделать вывод о существовании решения ЗОУ (если решение не существует, управление производится по  $u_b$  или  $u_n$ ), а во-вторых, по  $\Lambda_{pr}$  выбирается наиболее подходящий вид функции управления на каждом шаге. Для того чтобы учесть изменение параметров объекта в процессе управления, нужно проводить параметрическую идентификацию на каждом шаге управления, что не очень эффективно, или использовать предлагаемый в настоящей работе подход.

Предлагается использовать корректируемую стратегию  $S_{кор}$  управления, в которой за счет весового коэффициента выбирается оптимальное сочетание стратегий по следующей формуле:

$$u_{k\text{ад}}^*(t) = cu_k^{pz}(t) + (1-c)u_k^{pr}(t), \quad (5.14)$$

где  $u_{k\text{ад}}^*(t)$  – 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  $\Delta\Lambda$ . Выбор  $\Delta\Lambda$  в качестве индикатора рассогласования обусловлен двумя факторами, во-первых, по значению  $\Lambda_{pz}$  можно сделать вывод о существовании решения ЗОУ (если решение не существует управление производится по  $u_b$  или  $u_n$ ), а во-вторых, по  $\{u_1^*(\bullet), u_2^*(\bullet), \dots, u_n^*(\bullet)\}$  выбирается наиболее подходящий вид функции управления на каждом шаге. Введем нечеткую переменную  $\lambda$ , характеризующую значения  $\Delta\Lambda$ . Продукционные правила сформируем в виде

- $\lambda_1$  : если  $\Delta\Lambda$  – большое, то стратегия – позиционная ( $c = 1$ );  
 $\lambda_2$  : если  $\Delta\Lambda$  – среднее, то стратегия – корректируемая (5.15)  
 ( $c$  определяется fuzzy logic);  
 $\lambda_3$  : если  $\Delta\Lambda$  – малое, то стратегия – программная ( $c = 0$ ).

Для реализации описанного подхода создана информационная технология, 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

$$R = (a = -0,1; b = 0,2; u_n = -3; u_v = 3; t_0 = 0; t_k = 20; \delta t = 1; x_0 = 10; \chi^k = [-0,5; 0,5]),$$

где  $\delta t$  – временной шаг дискретизации.

Будем считать, что наибольшее влияние на изменение  $\Delta\Lambda$  оказывает изменение параметра модели  $a$  (при  $b = \text{const}$ ). На рисунке 5.8 показан модуль настройки адаптивного регулятора.

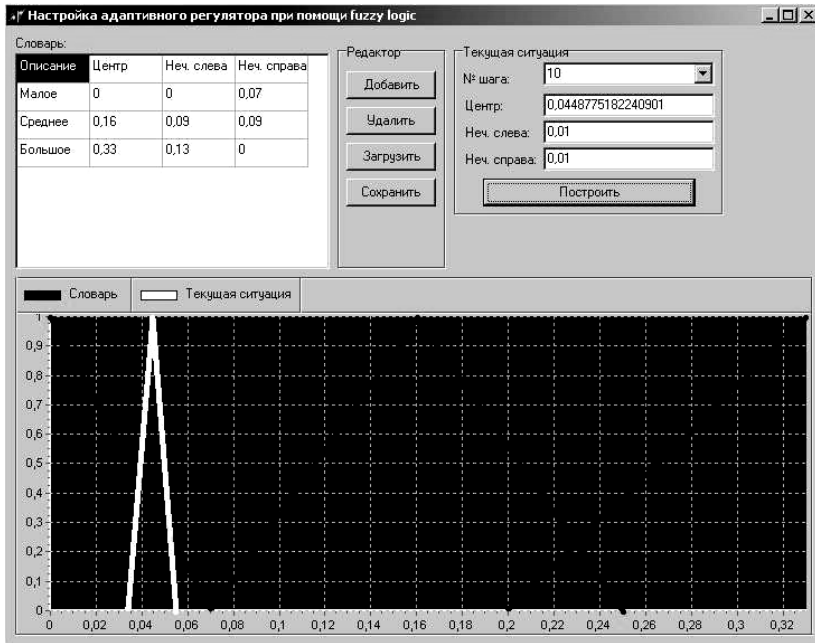


Рис. 5.8. Модуль настройки адаптивного регулятора

Здесь создается словарь нечетких чисел  $\tilde{\lambda}$ , и в процессе имитационного моделирования по формуле (5.15) с  $c = 0,5$  вычисляется отклонение  $\Delta\Lambda$  до шага адаптации (с которого рекомендуется начинать корректировку адаптивной стратегии изменяя коэффициент  $c$ ). В моделируемой задаче на десятом шаге вычисляется  $\Delta\Lambda_{pr}$  – «Центр» (см. рис. 5.8), задается величина нечеткости слева и справа и строится график нечеткого вывода по правилам (5.14), на основании которого при помощи метода лингвистической аппроксимации определяется значение коэффициента  $c$ . Затем с десятого шага управляющие воздействия (5.14) синтезируются с новым значением  $c$ .

Результаты моделирования приведены в табл. 5.8, где  $a_p$  – реальное значение параметра  $a$ , при отклонении  $\Delta\Lambda$ . Функционалы энергозатрат:  $J_3^{PrM}$  – при программной стратегии с  $a = a_p$ ,  $J_3^{Pr}$  – при программной стратегии с  $a$ , полученным при идентификации модели,  $J_3^{Pz}$  – при позиционной стратегии,  $J_3^{Ad}$  – при адаптивной стратегии,  $x_k^{Pr}$ ,  $x_k^{Pz}$ ,  $x_k^{Ad}$  – конечные значения вектора фазовых координат при программной, позиционной и адаптивной стратегиях управления соответственно.

По результатам моделирования проведем подсчет количества экспериментов, удовлетворяющих требованиям точности выхода на заданный режим  $Q_m$ , и минимума функционала затрат энергии  $Q_3$  (рассчитываются в процентах отношения к общему количеству). Для оценки результативности стратегии в случае равнозначности  $Q_m$  и  $Q_3$  введем совокупный критерий

$$Q = \frac{Q_m + Q_3}{2}.$$

Если показатели неравнозначны, то вводятся весовые коэффициенты. По сравнению полученных результатов (см. табл. 5.8) можно сделать вывод, что применение адаптивной стратегии (fuzzy logic) наиболее предпочтительно.

Назовем управление с адаптивной стратегией в случае, когда оператор синтеза не меняет вид, т.е. вектор синтезирующих переменных принадлежит одной зоне алгоритмом с мягкой коррекцией.

### 5.8. Результаты моделирования

$a_p$	$\Delta\lambda$	$c$	$J_{\text{ИрМ}}$	$J_{\text{Ир}}$	$J_{\text{ИБ}}$	$J_{\text{Ад}}$	$X_{\text{К}}^{\text{Ир}}$	$X_{\text{К}}^{\text{ИБ}}$	$X_{\text{К}}^{\text{Ад}}$
-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%

### 5.9. Совокупный критерий при различных стратегиях управления

Стратегия	$Q, \%$
Программная	65
Позиционная	90
Адаптивная (fuzzy logic)	100

Если вектор синтезирующих переменных пересекает границы зон, то происходит изменение оператора синтеза. Такой алгоритм будем называть алгоритмом жесткой коррекции. 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.

## **6. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ**

---

Интеллектуальная информационно-управляющая система представляет собой 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.

### **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 параметров 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 четвертом разделе 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 трудноформализуемыми тепло-технологическими 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 (рис. 6.1), 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 моделирования UML (Unified Modeling Language – унифицированный язык моделирования). Он является основой 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 проектирование кода, создавая, таким образом модели уже существующих систем [40].

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 [41]. Функционирование рабочего прототипа осуществляется на базе платформы выбранных технических средств.



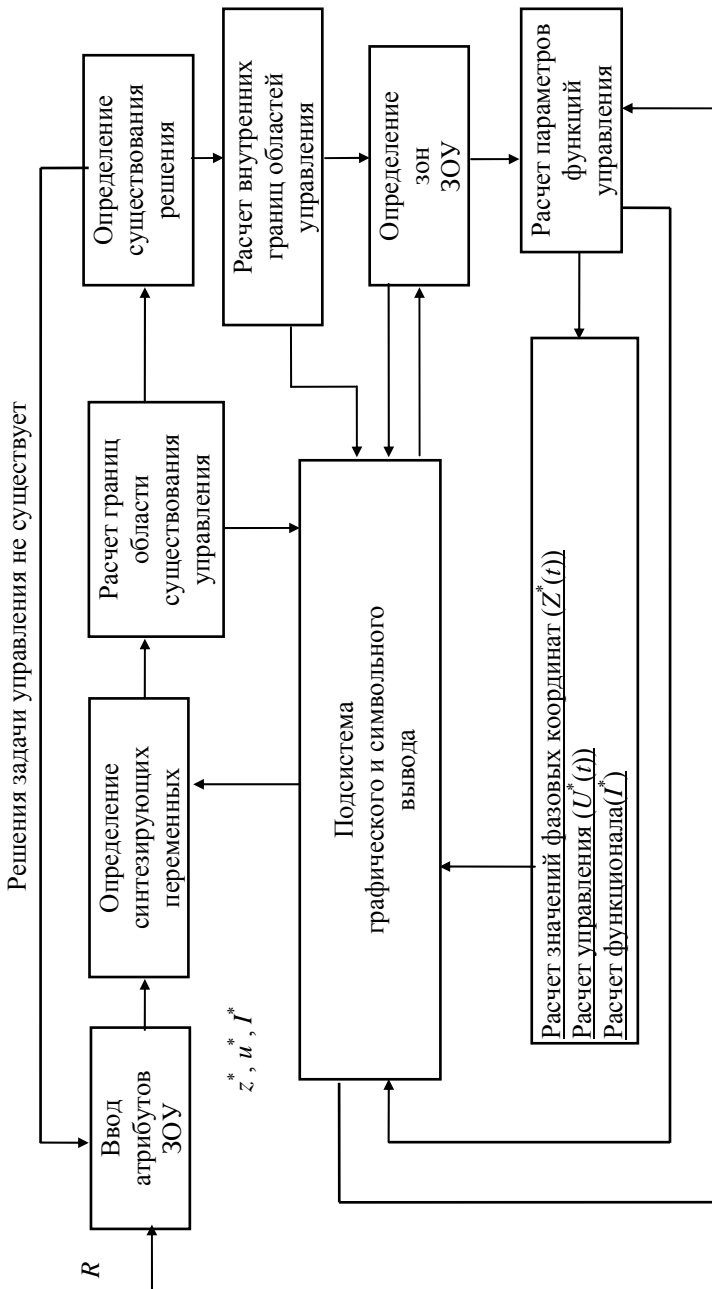


Рис. 6.1. Структурная схема взаимодействия типовых модулей анализа и синтеза управления исследовательского прототипа режима «Пуск»

Ядром программного обеспечения ИИУС ТТА является фреймовая база знаний. В базе знаний хранятся процедурные знания в 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, осуществляющих их обработку по заданному алгоритму. Некоторые фреймы содержат слоты, заполнителями которых являются правила продукций. При создании базы знаний исследовательского прототипа проводилась работа по унификации имен фреймов, это дает возможность оперативного построения баз знаний рабочих прототипов.

Программно база знаний представляет собой набор классов, созданных в среде визуального программирования Borland Developer Studio 2006 на языке Object Pascal.

## **6.2. ИНФОРМАЦИОННОЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

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, диалоговых 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 стадий при использовании многостадийных моделей (режим «Пуск»). Математическое, методическое и алгоритмическое обеспечение этих модулей приведено в предыдущих главах. Структурные схемы их взаимодействия представлены на рис. 6.1 и 6.2. Из структурной схемы рис. 6.1 видно функциональное назначение каждого блока. Созданный пакет программ также является составной частью базы знаний.

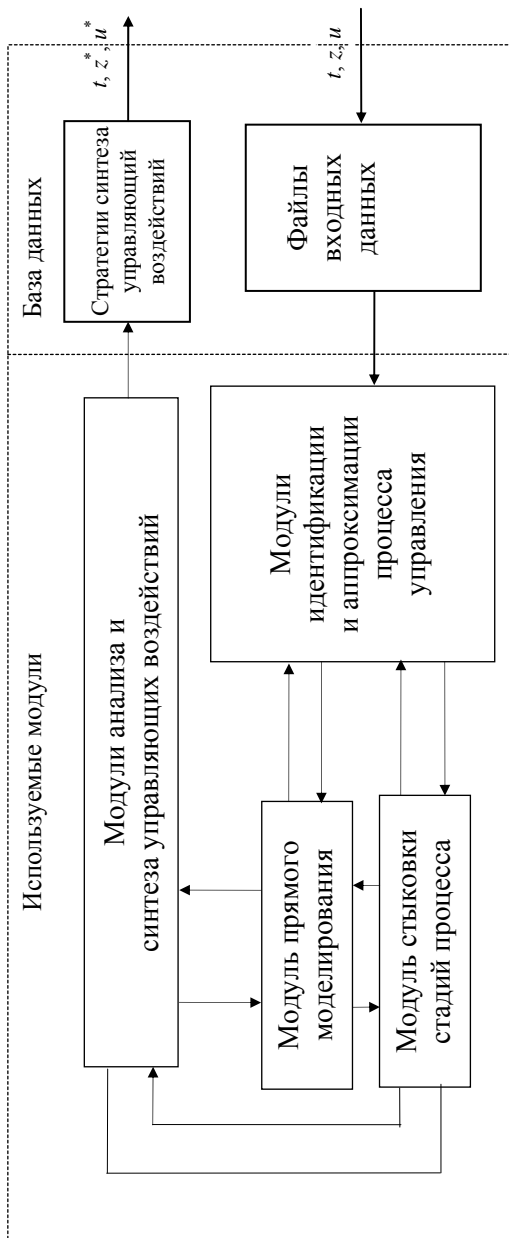


Рис. 6.2. Структурная схема взаимодействия программных модулей при решении задач анализа и синтеза энерго- или ресурсосберегающего управления для объектов, описываемых многостадийными моделями (режим «Пуск»)

На рисунке 6.2 приведена структурная схема взаимодействия программных модулей исследовательского прототипа ИИУС ТТА. Она выполняет следующие функции: идентификацию модели объекта на МСФ (получение «многостадийной 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 выше в (3.1) – (3.26), позволяет определить модель динамики исследуемого объекта, в том числе и многостадийную, 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 стадий. 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. Для аппроксимации используются методы «скользящей оценки» параметров модели. Идея данных методов заключается в последовательном расчете параметров для групп экспериментальных значений с использованием формулы Коши.

Модуль синтеза оптимальных программ служит для получения единой программы объекта, динамика управляемого процесса которого представлена многостадийной моделью. Он работает на основании следующей методики стыковки составляющих частей многостадийной модели:

- задаются известные массивы реквизитов каждой стадии, 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 стадий;

- для каждой стадии на каждом временном интервале производится расчет оптимального управления, траектории изменения фазовых координат и функционал затрат;
- рассчитываются суммы функционалов всех стадий 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 стадии модели в единую оптимально-управляющую режимом «Пуск» программу. В основе модуля лежат методы динамического программирования и синтезирующих переменных.

Полученная оптимальная программа обрабатывается 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.

### 6.2.1. БАЗЫ ДАННЫХ И ЗНАНИЙ ИИУС ТТА

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.

При разработке информационно-управляющей подсистемы особое внимание уделялось проектированию интеллектуальной базы данных, которая в отличие от традиционной обеспечивает выборку необходимой информации, не присутствующей в явном виде, а выводимой

из совокупности хранимых данных. В результате проведения системного анализа предметной области исследования была получена информационная модель ТТА, 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 технологии алгоритмизации синтеза управляющих воздействий (см. рис. 1.2 раздела 1). Поэтому декларативная информация информационно-управляющей подсистемы может быть как результатом работы модулей страт, так и результатом общения системы с внешней средой посредством интерфейса пользователя. Таким образом, основной целью проектирования базы данных ИИУС ТТА являлась разработка оптимального способа представления и сохранения записей, как с точки зрения ее практической реализации, так и с точки зрения управления данными.

Проектирование базы данных проводилось с учетом целостности данных. Под целостностью будем понимать соответствие информационной модели предметной области, хранимой в базе данных, реальным объектам и их взаимодействиям в каждый момент времени [42, 43]. База данных создавались таким образом, чтобы любое изменение предметной области, значимое для информационно-управляющей подсистемы, отражалось в базе данных, и при этом сохранялась однозначная интерпретация 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 – сушильной установки вальцеленточного типа.

База данных ИИУС СВЛ проектируется согласно морфологической модели объекта  $M_n^O = \langle NO, SF, RR, CU, K \rangle$ . 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: стратегии управления «Программная стратегия управления», «Позиционная стратегия управления», «Морфологическая модель объекта управления», «Технологические режимы работы», «Математические модели объектов», «Исходные данные», «Массив реквизитов», «Результаты». Атрибутами сущности «Исходные данные» являются: номер СВЛ, номер цеха, количество секций, комментарий. Здесь ключевым атрибутом выбран номер СВЛ.

Каждая СВЛ представляет собой сложный многокамерный аппарат, которому соответствует множество задач со своими исходными данными, поэтому атрибутами сущности массив реквизитов являются: виды задач, параметры моделей и накладываемые ограничения. Причем на объекты управления по каналам управления и измерения могут действовать ДФ, интенсивности которых являются атрибутами сущностей «Интенсивность».

Результат работы модуля имитационного моделирования (ИМ) – расчетные функционалы затрат, являются атрибутами сущности «Функционал затрат».

Исходные данные, виды алгоритмов, текущие значения управления являются атрибутами сущности «Результаты».

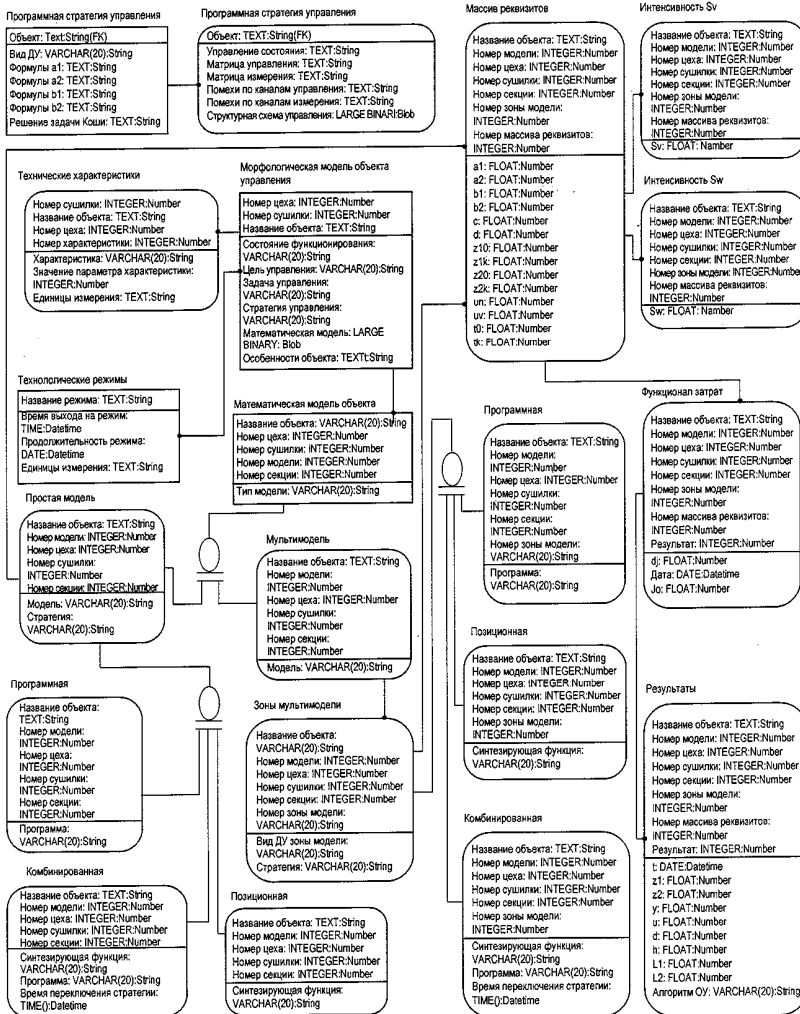
Классическая теория проектирования реляционных баз данных связана с теорией нормализации, основанной на анализе функциональных зависимостей между атрибутами отношений. В результате нормализации данных информационные модели БД различных режимов имеют следующий вид: рис. 6.3 – фрагмент информационной модели БД режима «пуск» и рис. 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 (см. раздел 3.5).

Результаты работы модуля, определение мер доверия (МД) – расчетные значения мер доверия являются атрибутами сущности Мера доверия, рассчитанная по методу Демпстера–Шафера.

Ядром информационно-управляющей подсистемы является база знаний БЗ. Она имеет стратифицированную иерархическую структуру, представленную множеством взаимосвязанных фреймов, образующих единую фреймовую систему, в которой объединяются декларативные

и процедурные знания, а также организованы принципы, присущие объектно-ориентированному подходу, такие как инкапсуляция, наследование и полиморфизм. Фреймы базы знаний имеют слоты, содержащие не только конкретное значение, но также имена процедур, позволяющих вычислять это значение по заданному алгоритму.



### 6.3. Фрагмент информационной модели (ER-модель) БД режима «Пуск»



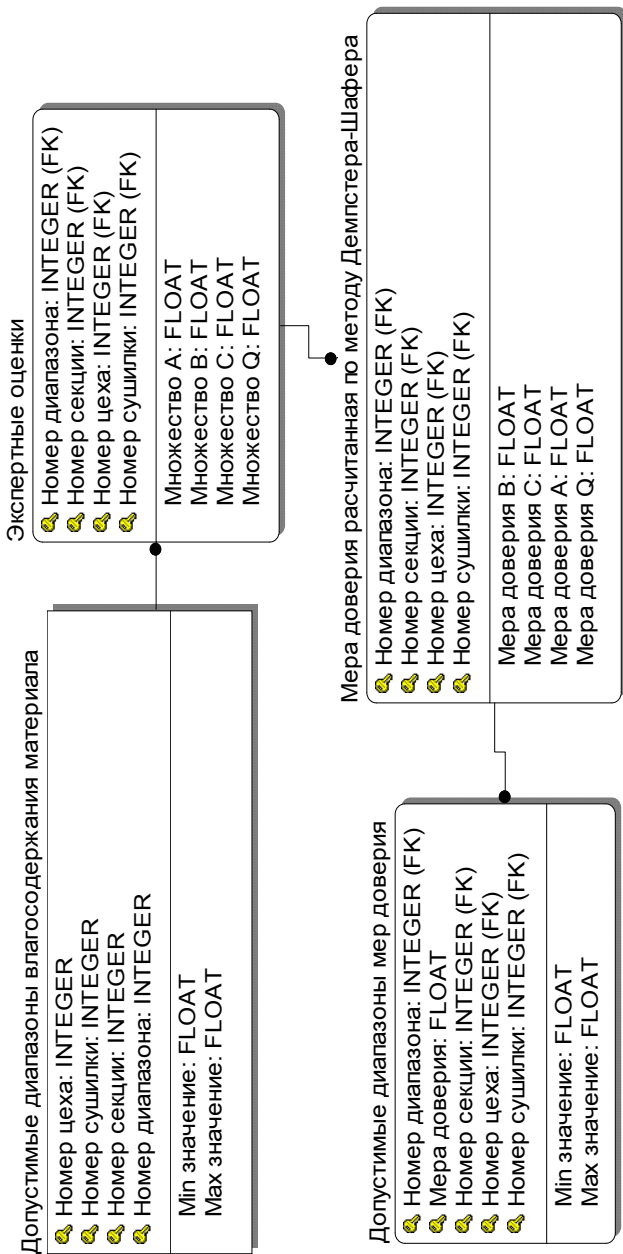


Рис. 6.4. Фрагмент информационной модели (ER-модель) БД режима «Процесс»

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.

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. Программно фреймовая база знаний ИИУС представляет собой набор классов, созданных в среде визуального программирования Borland Developer Studio 2006 на языке Object Pascal. Статические модели фрагментов структуры БЗ для режимов «Пуск» и «Процесс» изображены на рис. 6.6 и 6.7 соответственно. Эти модели представлены в нотации UML в виде диаграмм классов.

Фреймы, представленные в виде классов рис. 6.8, используются для обеспечения функциональности 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).

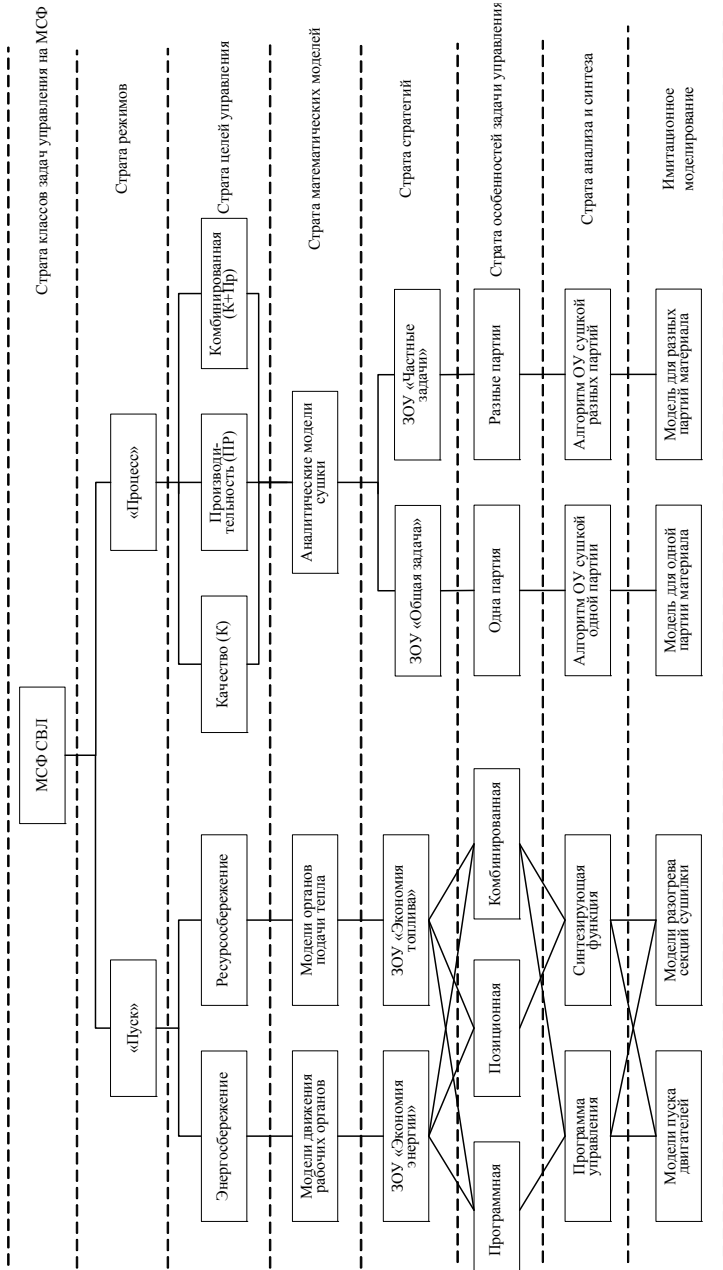
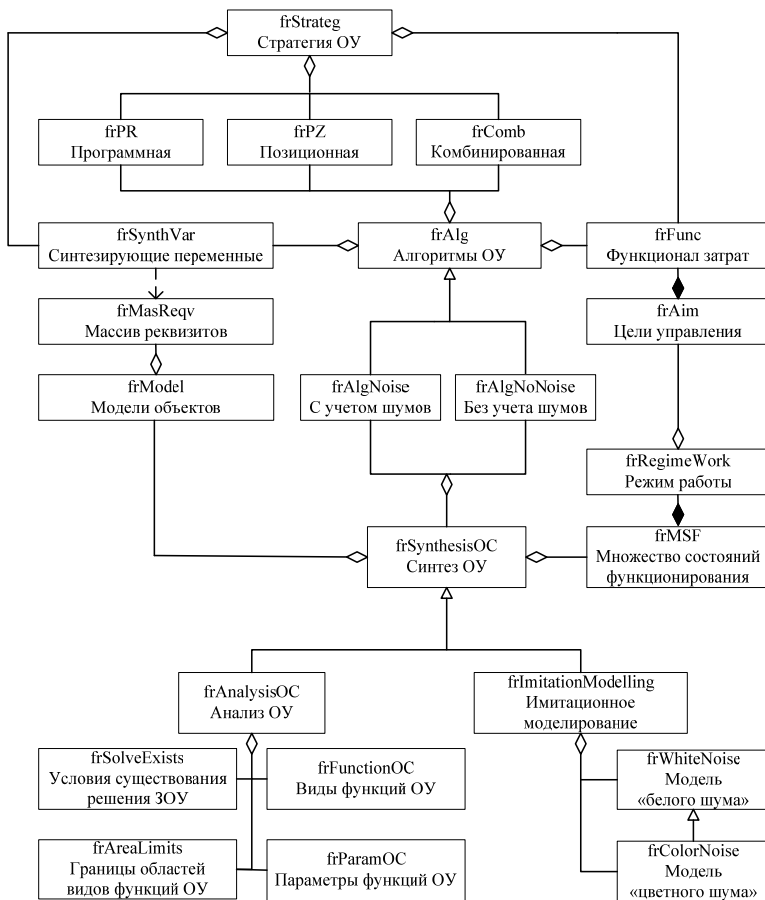


Рис. 6.5. Граф технологии интеллектуализации синтеза управляющих воздействий рабочего прототипа ИИУС СВЛ



**Рис. 6.6. Фрагмент статической модели  
фреймовой базы знаний ИИУС СВЛ режима «Пуск»**

Модуль имитационного моделирования использует фрейм `frImitationModelling`, включающий фреймы моделирования «белых» (`frWhiteNoise`) и «цветных» (`frColorNoise`) шумов.

Модуль синтеза для решения задач управления сушильной установкой использует фрейм `frSynthesisOC`, включающий фреймы:

- математических моделей объектов (`frModel`);
- алгоритмов управления (`frAlg`), от которого наследуются фреймы `frAlgNoise` и `frAlgNoNoise`;
- множества состояний функционирования (`frMSF`).

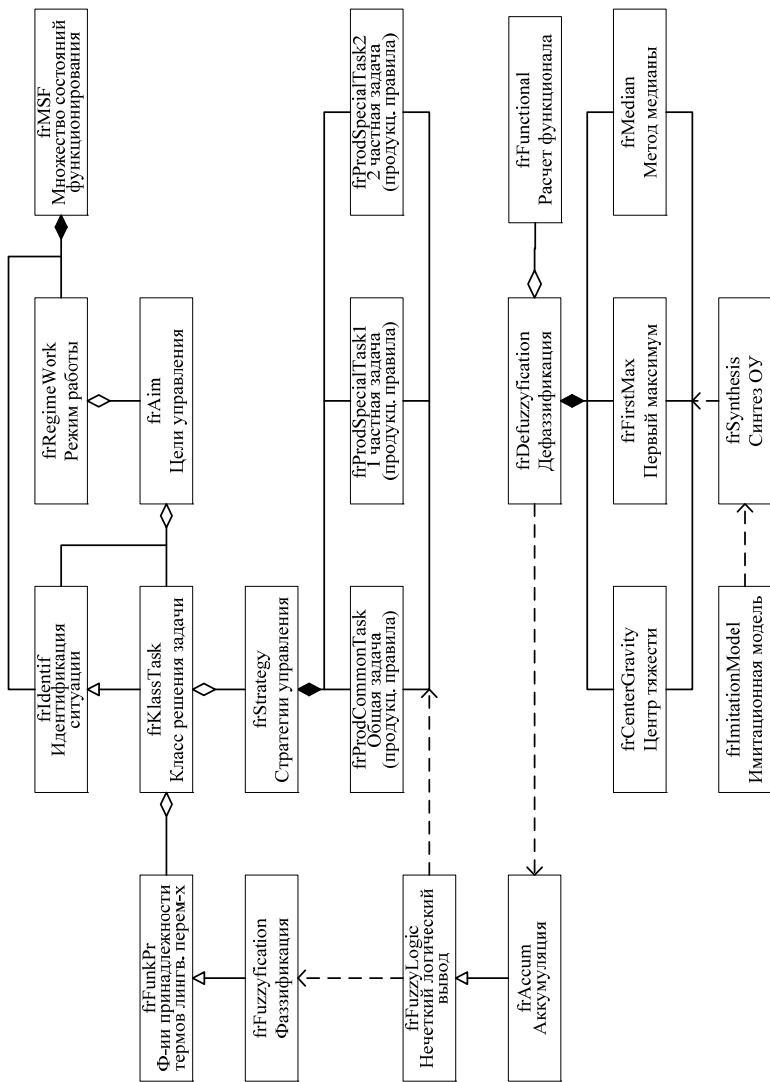


Рис. 6.7. Фрагмент статической модели базы знаний ИИУС СВЛ режима «Процесс»

Фрейм массива реквизитов (frMasReqv) агрегирует фрейм моделей (frModel) и связан отношением зависимости с фреймом расчета синтезирующих переменных frSynthVarEng.

Фреймы базы знаний, представленные на рис. 6.7, используются для обеспечения функциональности программных модулей ИИУС СВЛ, работающих в режиме «Процесс».

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 (frClassTask). Этот фрейм агрегирует фреймы frStrategy и frFuncPr. Фрейм frStrategy содержит три фрейма стратегий управления frProdCommonTask, frProdSpecialTask1 и frProdSpecialTask2 соответствующие общей задаче управления (16) – (19) (отчет по проекту 2014 года).

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 frDefuzzification входят фреймы, отражающие процедурные знания следующих методов: центр тяжести (frCenterGravity), первый максимум (frFirstMax) и медианы (frMedian). Фрейм frFunctional включен во фрейм frDefuzzification.

Модуль синтеза оптимального управления использует фрейм frSynthesis, который использует знания фрейма frDefuzzification.

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 позволило увеличить вероятность выхода качественной продукции до 0,98, а также повысить производительность процессов сушки на 5%.

### **6.3. РАБОЧИЙ ПРОТОТИП 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. Полученный алгоритм перед первым применением на объекте проходит тестирование 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 посредством интеллектуального интерфейса системы. Структурная схема информационно-управляющей подсистемы приведена на рис. 6.8.

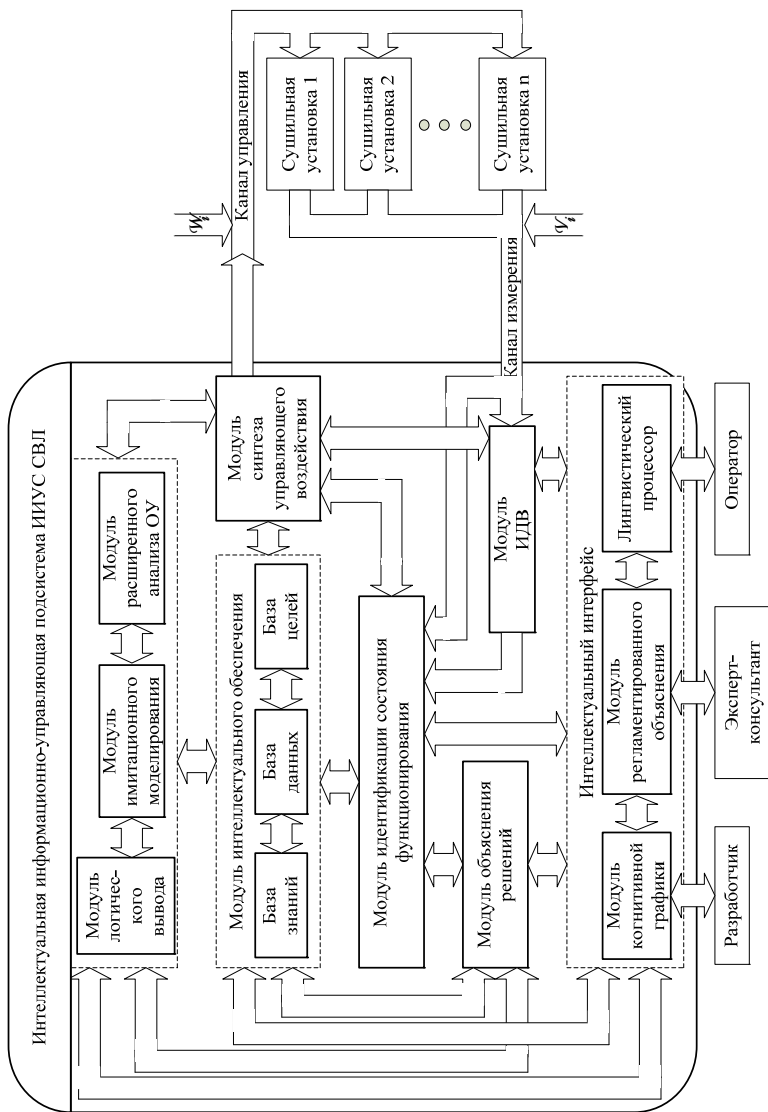


Рис. 6.8. Структурная схема информационно-управляющей подсистемы



Информационно-управляющая подсистема в режиме «Процесс» работает согласно следующему алгоритму. Информация от информационно-измерительной подсистемы ИИУС СВЛ (модуль ИДВ) о текущей влажности материала в лимитирующих камерах поступает в модуль идентификации состояния функционирования, где в зависимости от сложившейся ситуации определяется класс решаемой задачи управления. Проверяется база данных и база знаний на наличие решения задачи с такими данными. Если информация не найдена, то для задач классов  $K_{n,n+1}$  и  $K_0$  рассчитывается мера доверия по методу Демпстера–Шафера. Информация о задаче записывается в базу данных, и управление передается модулю логического вывода.

В модуле логического вывода согласно решаемой задаче, используя базу знаний и базу данных, производится фаззификация. При этом функции принадлежности, определенные для входных переменных, применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила. После этого происходит логический вывод, т.е. вычисленное значение истинности для предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила. Это приводит к одному нечеткому подмножеству, которое будет назначено переменной вывода для каждого правила. В качестве правил логического вывода используется операция минимума. Затем нечеткие подмножества, назначенные для каждой переменной вывода (во всех правилах), объединяются вместе, чтобы сформировать одно нечеткое подмножество для каждой переменной вывода. При подобном объединении используются операции максимум. На следующем этапе производится дефаззификация – приведение к четкости, т.е. преобразование нечеткого набора выводов в число несколькими методами. Полученные значения управляющих воздействий решаемой задачи передаются в модуль объяснения решения и сохраняются в базе данных. После чего управление передается модулю синтеза оптимального управления, в котором формируется программа оптимального управления многосекционной сушильной установкой.

Основой информационно-измерительной подсистемы ИИУС СВЛ, которую также будем называть системой мониторинга влажности материала, являются интеллектуальные датчики влажности (ИДВ), позволяющие проводить косвенные измерения влажности материала непосредственно в процессе сушки в реальном времени. На стадии технического проектирования ИИУС ТТА особое внимание уделяется созданию особенностям технического обеспечения системы.

## 6.4. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для выбора технических средств проводится анализ существующих моделей промышленных контроллеров и измерительно-вычислительных устройств, предлагаемых в настоящее время для автоматизированных систем управления. По сформулированным критериям, решая задачу структурного синтеза, определяется оптимальный состав множества для обеих подсистем.

При создании промышленной микропроцессорной системы энергосберегающего оптимального управления процессами нагрева также возникает необходимость выбора базовых технических средств, способных функционировать в реальном масштабе времени на объекте управления.

Вычислительные устройства, обеспечивающие технические средства нижнего уровня в микропроцессорных системах управления через датчики, и исполнительные устройства связаны непосредственно с объектом и должны работать в темпе, определяемом скоростью событий в объекте. Как правило, они должны воспринимать большое число входных аналоговых, цифровых и дискретных сигналов и в соответствии с управляющей программой рассчитывать и посылать управляющие воздействия. Во многих случаях к ним предъявляются очень жесткие требования по скорости реакции на внешние события и скорости переключения с одной программы на другую. Важным требованием является также высокая их надежность, поскольку отказ устройства может привести к выходу из строя дорогостоящего оборудования.

Основные характеристики надежности не могут достаточно точно определяться для программно-технических средств микропроцессорной системы управления. Из-за высокой надежности современных вычислительных элементов и плат невозможно пользоваться привычной характеристикой «число часов наработки на отказ». По этой причине характеристики надежности правильнее оценивать косвенными показателями:

- глубиной и полнотой диагностических тестов определения неисправностей в отдельных компонентах программно-технических средств;
- наличием встроенных в систему блоков UPS (аккумуляторов) и временем их работы при прекращении питания системы от сети,

а также возможностью и длительностью перерыва питания (при отсутствии UPS) без нарушения функций управления.

При выборе микропроцессорного устройства управления (УУ), используемого для решения задач энергосбережения, определяются предпочтительные технические параметры для них.

Свойства основного компонента системы управления – контроллера существенно различаются у разных производителей. Если выделить существенные из них, то это будут: тип основной вычислительной платы, разрядность, рабочая частота, наличие и объем различных видов памяти ОЗУ, энергонезависимой ПЗУ (объем памяти для программ пользователя), оперативной системы контроллера, максимальное число входов-выходов (аналоговых, дискретных, импульсных), которые можно подключить к контроллеру.

УУ должны: иметь большую производительность при умеренной стоимости; обладать экономным потреблением энергии, обеспечивать удобство и простоту использования для работы пользователей, не имеющих специальной подготовки; располагать обширным комплексом инструментальных средств, облегчающих разработку новых программ.

В множество технических средств ИИУС ТТА могут включаться следующие элементы: компьютеры любых моделей; промышленные контроллеры; устройства сбора, накопления, обработки, передачи и вывода информации; устройства передачи данных и линий связи; оргтехника и устройства автоматического съема информации; эксплуатационные материалы и др.

Используемые аппаратные средства интеллектуального датчика влажности материала (см. рис. 2.1) позволяют обеспечить необходимую точность его работы (рассчитанная полная погрешность прямого эксперимента с учетом систематической и случайной составляющих не превышает 6,8).

## **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. Предельная погрешность, обусловленная округлением, равна половине единицы последнего разряда числового значения. 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 применения 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 недопущение 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 дан-

ные для этих областей определяются в ИИУС ТТА путем решения обратной задачи и образуют множество, для которого решение ЗОУ динамическими режимами лежит на границе 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.

## 7. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИИУС ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТТА

### 7.1. ПРИМЕРЫ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В РЕЖИМЕ «ПУСК» ВАЛЬЦЕЛЕНТОЧНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В режиме «ПУСК» необходимо разогреть камеры сушильной установки вальцеленточного типа (СВЛ) без загрузки пастообразного материала до их рабочей температуры. В соответствии с классификацией систем на МСФ задача управления относится к первому классу согласно [13]. Здесь в качестве объектов управления рассматриваются паровые калориферы камер. При управлении СВЛ решается задача ресурсосберегающего управления (2.23) – (2.27) для функционала вида «расход топлива». Для решения поставленной задачи определяется множество моделей в виде дифференциальных уравнений с разрывной правой частью.

Определение видов моделей камер, числа стадий и оценки параметров проводилось согласно методике (приведенной в отчете этапа 2014 года). Для чего проведен эксперимент и сняты термограммы разогрева пятисекционной СВЛ (рис. 7.1). В результате решения задачи структурной идентификации были выделены оптимальные структуры моделей динамики камер, основным критерием выбора был минимум максимального значения абсолютной погрешности модели  $\Delta z$  [44]. Результаты структурной идентификации приведены в табл. 7.1.

Калориферы, установленные в камерах СВЛ, отличаются своими техническими характеристиками и, следовательно, изменяются виды и параметры моделей динамики  $m_i$  для каждой камеры. Соответственно камерам определены оптимальная управляющая программа  $u_i^*(\bullet) = (u_i^*(t), t \in [t_i^0, t_i^K])$  и траектория изменения фазовых координат  $z_i^*(\bullet) = (z_i^*(t), t \in [t_i^0, t_i^K] / u_i^*(t))$ .

Сформулированную выше (2.23) – (2.27) общую задачу управления можно представить в виде ряда частных задач применительно к отдельным камерам СВЛ [45, 46]. Эти задачи управления относятся

к классу задач с закрепленными концами траектории изменения фазовых координат, ограничениями на управляющее воздействие в каждый момент времени и минимизируемым энергетическим функционалом вида «расход топлива».

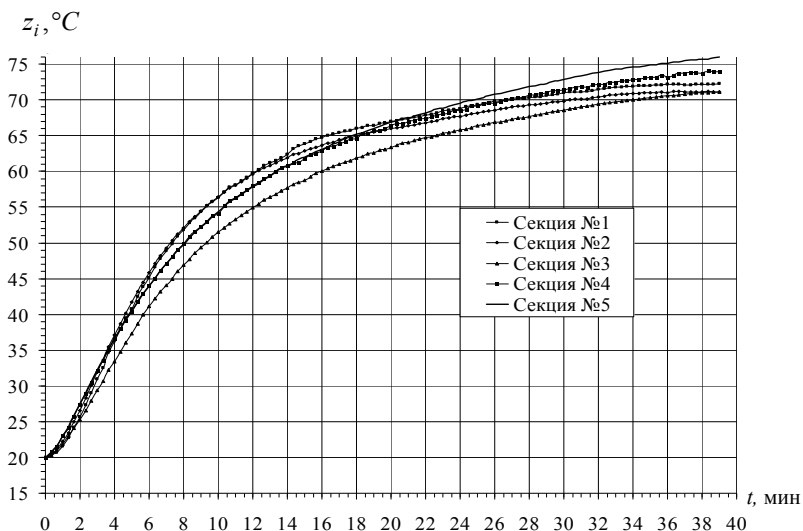


Рис. 7.1. Термограммы разогрева секций СВЛ

### 7.1. Структуры моделей динамики секций СВЛ

Номер секции	Вид модели
1	ДА + ДА
2	РДИ + А + А
3	ДИ + А + А
4	ДА + ДА
5	ДА + РДИ

Рассмотрим результаты работы ИИУС СВЛ для управления пяти-секционной СВЛ. Задача ресурсосберегающего управления имеет вид

$$\mathcal{M} = \{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\},$$



$$M_1 : \begin{pmatrix} \dot{z}_{11}^1 \\ \dot{z}_{12}^1 \\ \dot{z}_{11}^2 \\ \dot{z}_{12}^2 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0,1028 & -0,9747 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{11}^1(t) \\ z_{12}^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,0875 \end{pmatrix} u_1^1(t) + \\ + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,2228 \end{pmatrix} l_1^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,3464 \end{pmatrix} r_1^1(t), z_{11}^1 \in [20; 59,7), \\ \text{-----} \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0,8615 & -0,1319 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{11}^2(t) \\ z_{12}^2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1,1032 \end{pmatrix} u_1^2(t) + \\ + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,7312 \end{pmatrix} l_1^2(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,2746 \end{pmatrix} r_1^2(t), z_{11}^2 \in [59,7; 71]. \end{cases}$$

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

$$M_3 : \begin{pmatrix} \dot{z}_{31}^1 \\ \dot{z}_{32}^1 \\ \dot{z}_{31}^2 \\ \dot{z}_{31}^3 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{31}^1(t) \\ z_{32}^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,1225 \end{pmatrix} u_3^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,0519 \end{pmatrix} l_3^1(t) + \\ + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,0793 \end{pmatrix} r_3^1(t), z_{31}^1 \in [20; 29,4); \\ \text{-----} \\ -0,284z_{31}^2(t) + 0,1608u_3^2(t) + 0,5175l_3^2(t) + \\ + 0,8112r_3^2(t), z_{31}^2 \in [29,4; 51,5); \\ \text{-----} \\ -0,094z_{31}^3(t) + 0,1801u_3^3(t) + 0,1279l_3^3(t) + \\ + 0,01r_3^3(t), z_{31}^3 \in [51,5; 71,1]. \end{cases}$$

$$M_4 : \begin{pmatrix} \dot{z}_{41}^1 \\ \dot{z}_{42}^1 \\ \dots \\ \dot{z}_{41}^2 \\ \dot{z}_{42}^2 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0,2253 & -0,3757 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{41}^1(t) \\ z_{42}^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,1772 \end{pmatrix} u_4^1(t) + \\ + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,1317 \end{pmatrix} l_4^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,4508 \end{pmatrix} r_4^1(t), z_{41}^1 \in [20;58], \\ \dots \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0,1492 & -0,0941 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{41}^2(t) \\ z_{42}^2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,0516 \end{pmatrix} u_4^2(t) + \\ + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,672 \end{pmatrix} l_4^2(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,096 \end{pmatrix} r_4^2(t), z_{41}^2 \in [58,7;71,4]. \end{cases}$$

$$M_5 : \begin{pmatrix} \dot{z}_{51}^1 \\ \dot{z}_{52}^1 \\ \dots \\ \dot{z}_{51}^2 \\ \dot{z}_{52}^2 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0,1549 & -0,4715 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{51}^1(t) \\ z_{52}^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,1133 \end{pmatrix} u_5^1(t) + \\ + \begin{pmatrix} 0 \\ -1,1003 \end{pmatrix} l_5^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,0687 \end{pmatrix} r_5^1(t), z_{51}^1 \in [20;57,9), \\ \dots \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0,8291 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{51}^2(t) \\ z_{52}^2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,2574 \end{pmatrix} u_5^2(t) + \\ + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,7862 \end{pmatrix} l_5^2(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,2604 \end{pmatrix} r_5^2(t), z_{51}^2 \in [57,9;72,9]. \end{cases}$$

$$y_i^j = z_{i1}^j(t) + v_i^j(t), \quad i = \overline{1,5}, j = \overline{1,3},$$

$$z_i^j(t_0) = (20; 20; 20; 20; 20)^T \rightarrow z_i^j(t_k) = (71; 69,8; 71,1; 71,4; 72,9)^T,$$

$$\forall t \in [t_0, t_k]: u_i^j(t) \in [0, 100],$$

$$J = \int_{t_0}^{t_k} |u_i^j(t)| dt \rightarrow \min.$$

Графики управляющих воздействий приведены на рис. 7.2. На рисунке 7.3 приведены графики траекторий изменения первой фазовой координаты при оптимальном и традиционном управлении.

Для управления движением рабочих органов в СВЛ используются электроприводы, содержащие двигатели. В СВЛ присутствуют двигатели рециркуляционных вентиляторов в каждой камере, двигатель общего вытяжного вентилятора, двигатели вальцов, пластинчатого и скребкового транспортеров.

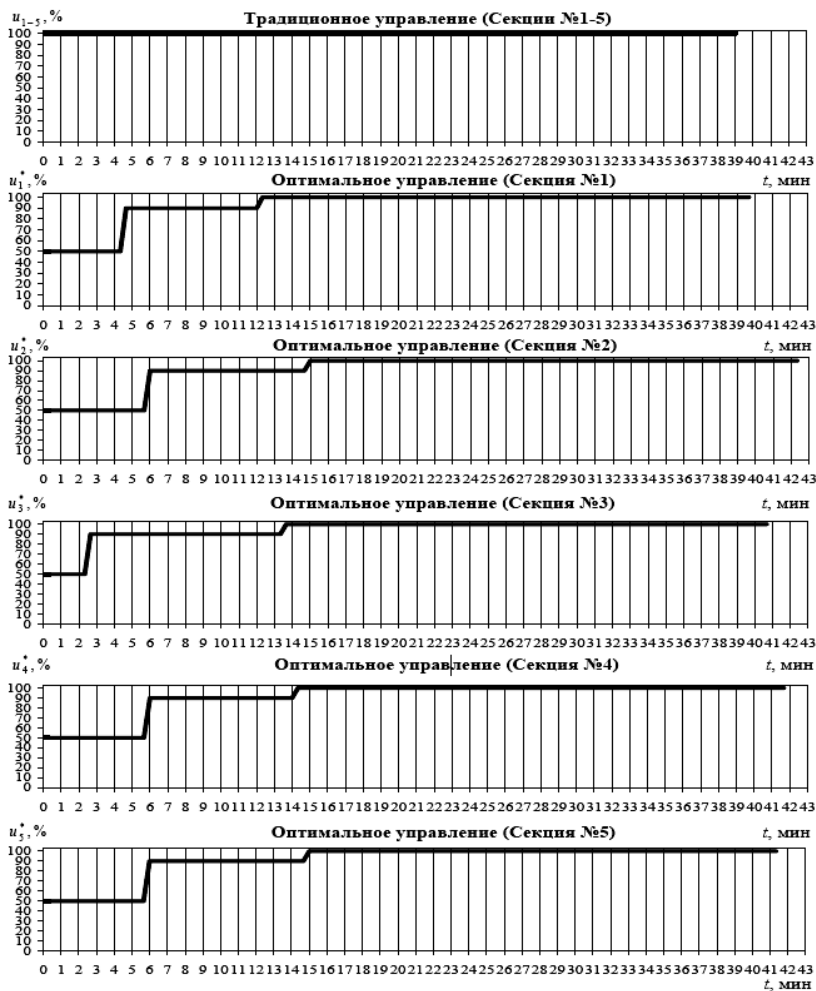
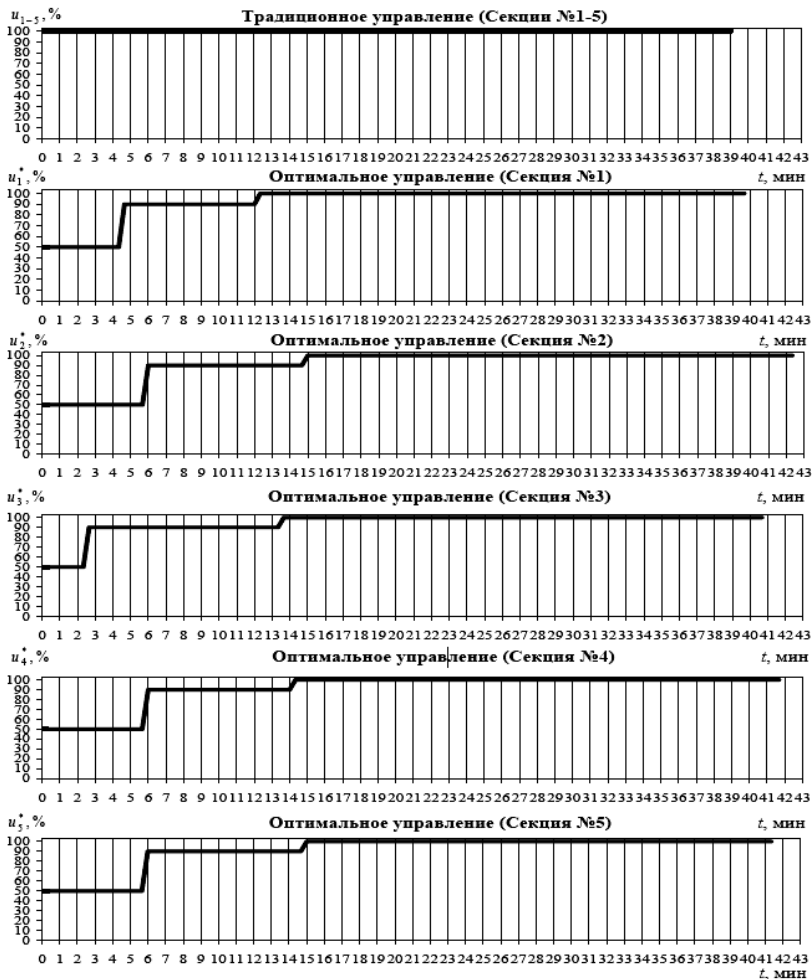


Рис. 7.2. Графики управляющих воздействий для пятисекционной СВЛ



**Рис. 7.3. Графики траекторий изменения фазовых координат для пятисекционной СВЛ при оптимальном и традиционном управлении**

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.

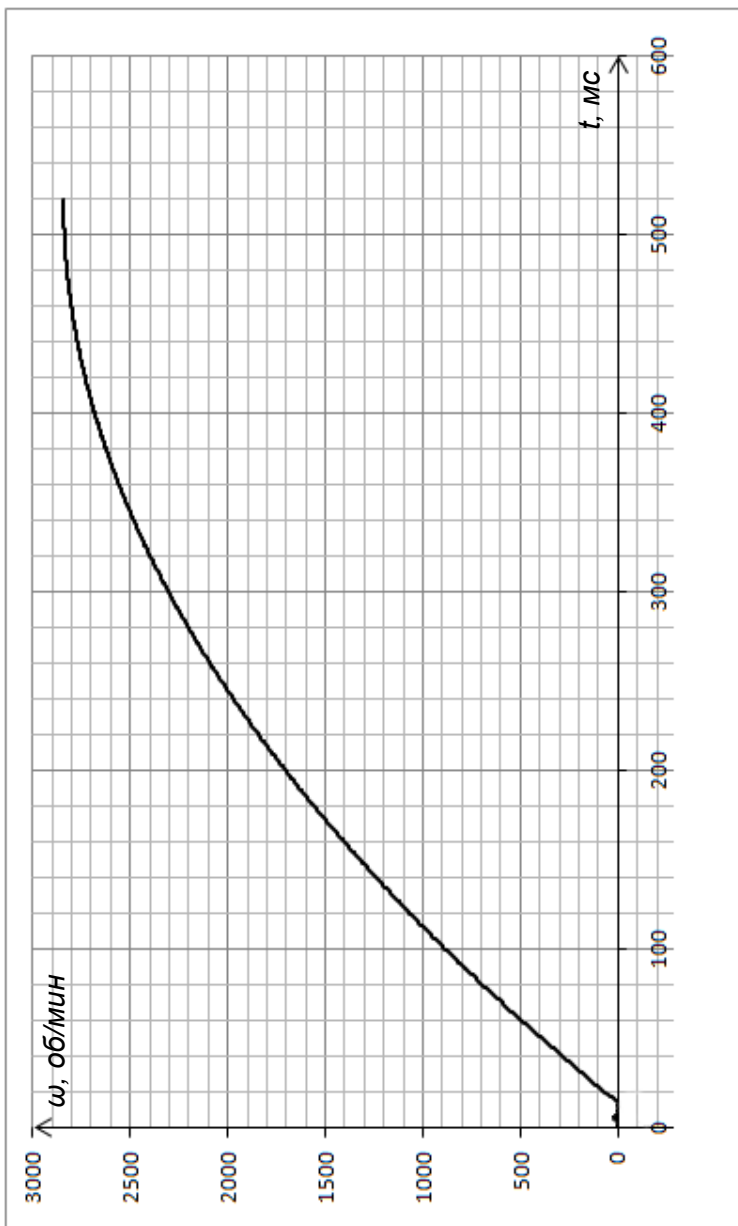


Рис. 7.4. Кривая разгона двигателя

При управлении двигателем решается задача энергосберегающего управления (2.23) – (2.27) для функционала вида «затраты энергии». Согласно [7 – 9], в качестве модели можно использовать дифференциальные уравнения, соответствующие объекту первого порядка – аperiodическое звено. Параметры модели определяются согласно методике, приведенной в отчете этапа 2014 года. Массив реквизитов ЗОУ имеет следующий вид:

$$R = (a = -0,0025, b = 0,033, u_0 = 0, u_B = 380, \\ t_0 = 50, t_k = 400, z_0 = 0, z_k = 3000).$$

В результате решения задачи управления с использованием модуля <А, Э, Пр, О> ИИУС ТГА получена оптимальная программа управления, имеющая вид

$$u_7^*(t) = \begin{cases} 115,176e^{-0,00209(t-t_0)} + u_0, & t \in [t_0, 289,21) \\ u_B, & t \in [289,21, t_k]. \end{cases},$$

Интерфейс используемого модуля представлен на рис. 7.5.

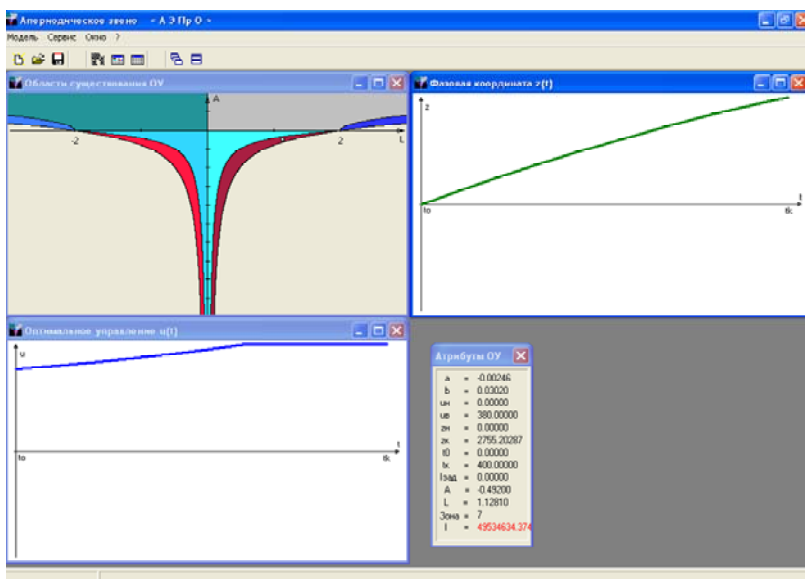


Рис. 7.5. Графический интерфейс модуля анализа оптимального управления <А, Э, Пр, О>

Экономия энергии при данном управлении составляет 13,93%.

ИИУС СВЛ внедрена на ОАО «Пигмент» (г. Тамбов) и применяется для управления динамическими режимами процессов сушки красителей, входящих в состав типографской краски. Экономия энергоресурсов в динамических режимах составляет 5...10%.

## **7.2. ПРИМЕРЫ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В РЕЖИМЕ «ПРОЦЕСС» ВАЛЬЦЕЛЕНТОЧНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

Важным резервом повышения качества материала на выходе многокамерной сушильной установки вальцеленточного типа является оценка его влажности в контролируемых камерах в процессе сушки. Реализовать эту цель позволяет разработанный метод оперативной оценки влажности движущегося пастообразного материала в процессе его сушки, который заключается в измерении различными датчиками (температуры, влажности, положений и т.д.) множества факторов, влияющих на процесс сушки.

Измерения проводят группами датчиков – общими (установленными на самой установке), и датчиками, располагающимися в *n*-й камере – самой напряженной по влагосъему. Будем называть эту *n*-ю камеру контролируемой. В контролируемой камере снимается основная или поверхностная влага. В ней также имеется воздухозаборное окно, обеспечивающее приток сушильного агента в камеру. Подогрев сушильного агента осуществляется в паровом калорифере. Отработанный сушильный агент отводится через сбросной шибер вытяжным вентилятором, который работает в цикличном режиме. Циклический режим отвода сушильного агента осуществляется включением и выключением вытяжного вентилятора; включение вентилятора происходит по достижению заданной максимальной, а выключение – по достижению заданной минимальной влажности сушильного агента. Сигналы, поступающие с датчиков, нормализуются и в этом виде подаются на входы заранее обученной нейронной сети, с выхода которой в реальном масштабе времени получают оценку текущей влажности материала в контролируемой камере.

Общие датчики предназначены для определения: влажности и температуры окружающей среды, включения/выключения вытяжного вентилятора, наличия/отсутствия ворошителя, скорости движения

пластинчатого конвейера. Датчики, установленные в  $n$ -й камере, предназначены для определения: влажности и температуры сушильного агента, степени открытия воздухозаборного окна и шиберов. На основании информации, полученной от датчиков, и известного значения начальной влажности материала рассчитываются значения входов нейронной сети.

Входами сети являются 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;  $x_6$  – интегральной оценки процента времени работы вытяжного вентилятора;  $x_7, x_8$  – средневзвешенных температуры и влажности сушильного агента в  $n$ -й камере;  $x_9, x_{10}$  – процента открытия воздухозаборного окна и сбросного шиберов.

Нормализация полученных значений производится по формуле

$$\overline{x_i} = x_i K_{\text{амп}}^{\text{н}} + K_{\text{оф}}^{\text{н}},$$

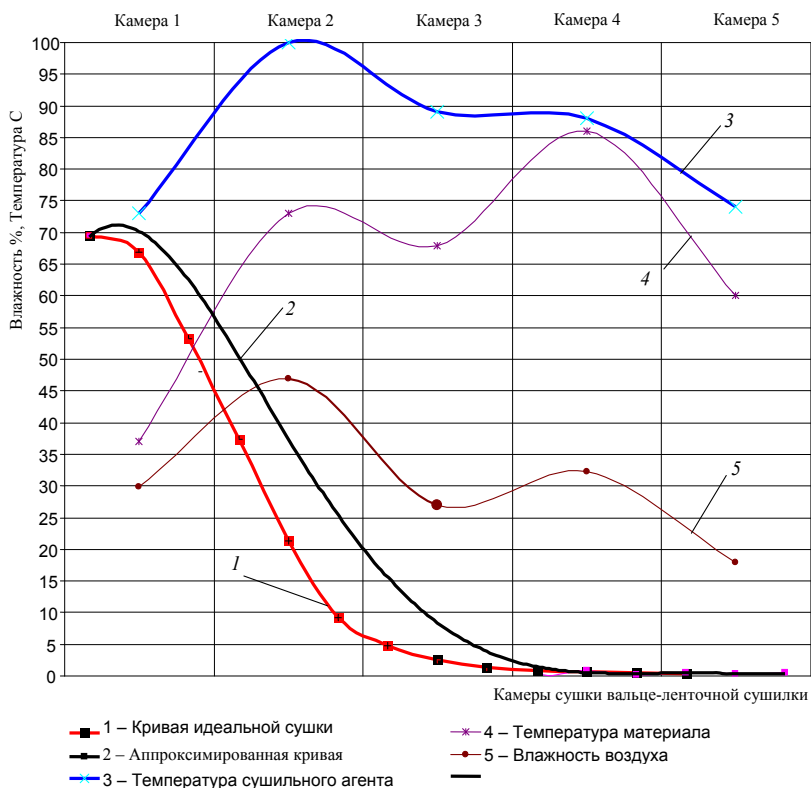
$$i = 1, \overline{V_n}, \quad (7.1)$$

где  $i$  – номер входа нейронной сети;  $\overline{x_i}, x_i$  – нормированное и ненормированное значения  $i$ -го входа нейронной сети,  $7$  соответственно;  $K_{\text{амп}}^{\text{н}}, K_{\text{оф}}^{\text{н}}$  – амплитудный и офсетный коэффициенты нормализации;  $V_n$  – число входов нейронной сети для расчета влажности  $\phi_n$ .

Обучение нейронной сети организуется по образцовым мерам технологических параметров в адаптивном диапазоне  $n$ -й камеры с фиксированной точностью.

Приведем методику определения образцовых мер факторов, влияющих на процесс сушки. Скорость движения ленты конвейера определяется для каждого технологического режима с помощью хронометрирования. Температура сушильного агента по каждой камере замеряется при помощи установленных в камере ртутных термометров. Температура отходящего сушильного агента измеряется на расстоянии 300 мм над сеткой. Температура материала измеряется на выходе из контролируемой камеры в средней точке по ширине и по толщине слоя. Отбор материала на анализ производится на выходе из  $n$ -й камеры в той же точке, где измерялась температура.





**Рис. 7.6. Кинетические кривые процесса сушки для пятикамерной сушильной установки**

Замер влажности высушиваемого материала проводится следующим образом: отбираются 9 проб материала из каждой камеры – 3 по длине и 3 по ширине камеры; анализ материала на содержание влаги производится методом сушки до постоянного веса с помощью анализатора влажности фирмы MettlerToledo, значения влажности высушиваемого материала по ширине камеры усредняются. Полученные результаты отображены в виде кинетических кривых процесса сушки (см. рис. 7.6).

Аналитическую модель оценки влажности материала в  $n$ -й камере, представляющую собой нейронную сеть и имеющую архитектуру многослойного персептрона, обученную по алгоритму обратного распространения ошибки, можно записать в виде

$$\overline{\phi}_n = \left[ 1 + \exp \left( -\beta_{\text{ВЫХ}}^{(n)} \left[ \sum_{j=1}^{N_n} w_j^{(n\text{ВЫХ})} \left( 1 + \exp \left( -\beta_j^{(n)} \left[ w_{1,j}^{(n)} \overline{x}_1 + w_{2,j}^{(n)} \overline{x}_2 + w_{3,j}^{(n)} \overline{x}_3 + w_{4,j}^{(n)} \overline{x}_4 + w_{5,j}^{(n)} \overline{x}_5 + w_{6,j}^{(n)} \overline{x}_6 + w_{7,j}^{(n)} \overline{x}_7 + w_{8,j}^{(n)} \overline{x}_8 + w_{9,j}^{(n)} \overline{x}_9 + w_{10,j}^{(n)} \overline{x}_{10} \right] - \theta_j^{(n)} \right) \right] - \theta_{\text{ВЫХ}}^{(n)} \right) \right]^{-1}, \quad (7.2)$$

где  $n$  – номер камеры;  $\beta_{\text{ВЫХ}}^{(n)}$ ,  $\beta_j^{(n)}$ ,  $\theta_j^{(n)}$ ,  $\theta_{\text{ВЫХ}}^{(n)}$  – углы наклона и сдвиги сигмоидальных активационных функций нейронов скрытого и выходного слоев нейронной сети;  $w_j^{(n\text{ВЫХ})}$ ,  $w_{i,j}^{(n)}$  – весовые коэффициенты связей нейронов скрытого и выходного слоев нейронной сети;  $N_n$  – число нейронов в скрытом слое сети для расчета влажности материала в  $n$ -й камере сушильной установки; нормализованные значения:  $\overline{\phi}_n$  – влажности материала на выходе  $n$ -й камеры;  $\overline{x}_1$  – начальной влажности материала;  $\overline{x}_2$ ,  $\overline{x}_3$  – температуры и влажности окружающей среды;  $\overline{x}_4$  – скорости движения пластинчатого конвейера;  $\overline{x}_5$  – наличия или отсутствия ворошителя;  $\overline{x}_6$  – процента времени работы вытяжного вентилятора;  $\overline{x}_7$ ,  $\overline{x}_8$  – температуры и влажности сушильного агента;  $\overline{x}_9$ ,  $\overline{x}_{10}$  – процента открытия воздухозаборного окна и сбросногошибера.

Для получения значения  $\phi_n$  влажности материала в натуральном масштабе выходной сигнал сети денормализуется

$$\phi_n = \frac{\overline{\phi}_n - K_{\text{оф}}^{\text{дн}}}{K_{\text{амп}}^{\text{дн}}}, \quad (7.3)$$

где  $K_{\text{оф}}^{\text{дн}}$ ,  $K_{\text{амп}}^{\text{дн}}$  – амплитудный и офсетный коэффициенты денормализации.

Полученная аналитическая зависимость (7.2) позволяет оценивать влажность материала в  $n$ -й камере сушильной установки в реальном масштабе времени в процессе его сушки с относительной погрешностью, не превышающей 2%.

Для оценки влажности пастообразного материала в процессе его сушки в вальцеленточной сушильной установке необходимо одно-

кратно провести настройку прибора, осуществляющего метод. Для этого определяется самая напряженная по влагосъему камера, в которую устанавливаются необходимые датчики. Согласно рис. 7.6 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 прибора, а также по образцовым мерам обучаем на персональном компьютере с использованием специализированных программ нейронную сеть. Полученные параметры сети –  $\beta_{\text{ВЫХ}}^{(n)}$ ,  $\beta_j^{(n)}$ ,  $\theta_j^{(n)}$ ,  $\theta_{\text{ВЫХ}}^{(n)}$  – углы наклона и сдвиги сигмоидальных активационных функций нейронов скрытого и выходного слоев нейронной сети;  $w_{i,j}^{(n)}$ ,  $w_j^{(n\text{ВЫХ})}$  – весовые коэффициенты связей нейронов скрытого и выходного слоев нейронной сети;  $N_n$  – число нейронов в скрытом слое сети – записываются в память прибора, вследствие чего прибор готов к использованию.

Алгоритм оценки влажности материала состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Опрос датчиков сушильной установки и вычисление значений входов нейронной сети.

Шаг 2. Проверка условия вхождения измеренных значений в адаптивные диапазоны значений, использовавшихся при обучении нейронной сети. В случае невыполнения условия, данные записываются в память (накопление статистики), о чем отправляется сообщение пользователю.

Шаг 3. Нормализация полученных значений по формуле (7.1).

Шаг 4. Расчет влажности материала по аналитической модели (7.2).

Шаг 5. Денормализация значения влажности материала по формуле (7.3).

Шаг 6. Сохранение рассчитанного значения в память (накопление статистики).

Описанный алгоритм реализован в интеллектуальном датчике влажности, функциональная схема которого приведена на рис. 7.7. Под интеллектуальным датчиком здесь подразумевается совокупность программно-технических средств, измерительных приборов и методов, позволяющая осуществить сбор, обработку, хранение, отображение и передачу информации в целях оперативной оценки влажности пастообразного материала без участия лица, принимающего решение.

Проведем оценку влажности материала для второй камеры пятисекционной вальцеленточной сушильной установки на примере выборки данных, представленных в табл. 7.2.

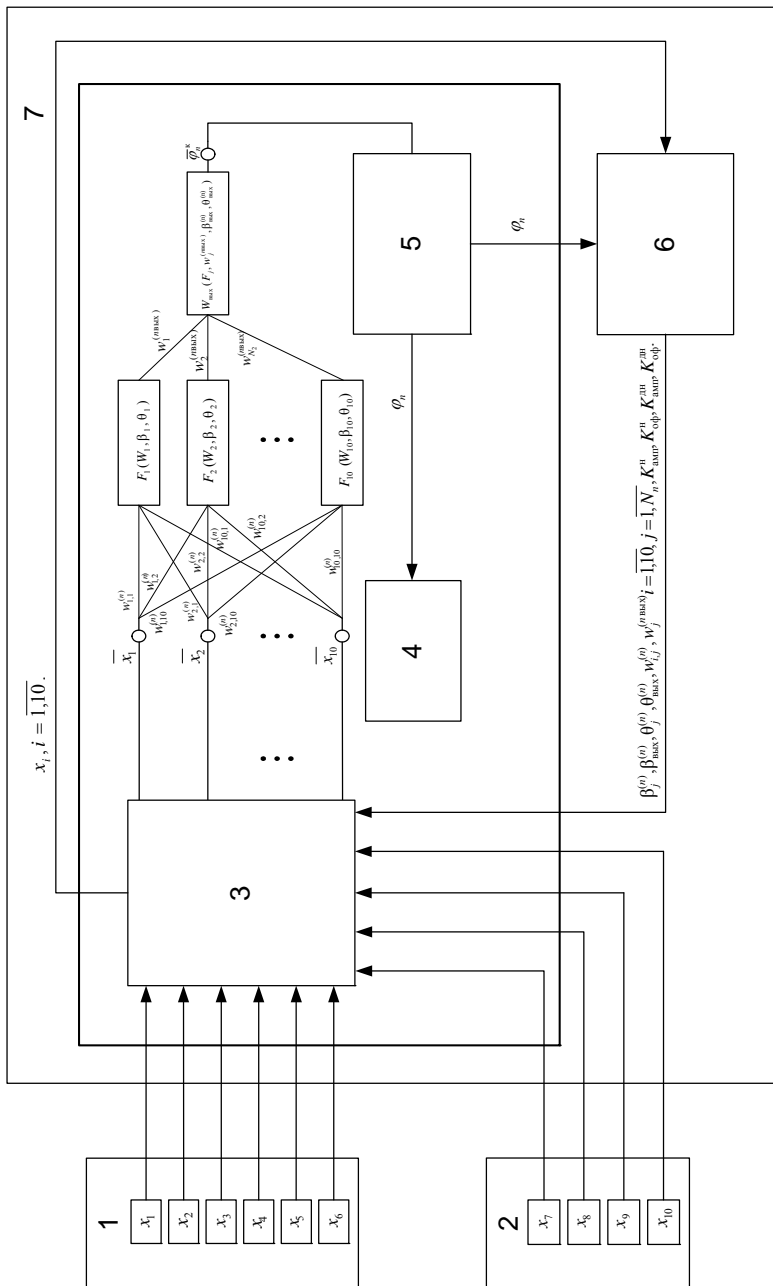


Рис. 7.7. Функциональная схема интеллектуального датчика влажности

## 7.2 Пример выборки данных

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	Образцовая мера $\phi_n = 2$	Оценка влажности по модели $\phi_n = 2$
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 (7.2) не превышает 0,2, а относительная – меньше 0,8%.

Метод позволяет проводить оперативную оценку в реальном масштабе времени влажности движущегося пастообразного материала в процессе его сушки. Оперативная оценка дает возможность, в случае отклонения значения влажности от идеальной влажности для  $n$ -й камеры, своевременно изменять настройки сушильной установки (скорость движения пластинчатого конвейера, степень открытия воздухозаборного окна и шиберы) в целях повышения качества сушки пастообразного материала.

Метод оперативной оценки влажности пастообразного материала в процессе его сушки в вальцеленточной сушильной установке внедрен на ОАО «Пигмент» (г. Тамбов). Применение метода позволило увеличить выпуск качественной продукции. Таким образом, достигается поставленная техническая задача оперативной оценки в реальном масштабе времени влажности движущегося пастообразного материала в процессе его сушки для управления этим процессом в целях обеспечения качества высушиваемого материала.

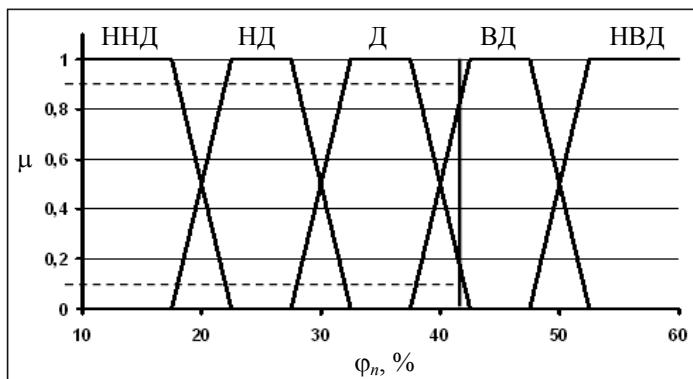
Управление процессом сушки в СВЛ в целях минимизации потерь качества и производительности предлагается осуществлять путем изменения скорости движения пластинчатого конвейера [19]. Приведем пример определения скорости движения пластинчатого конвейера для пятисекционной СВЛ. Пусть текущее значение скорости движения ленты  $\tilde{u}_o^{cl} = 3,5$  м/ч. При этой скорости влажность материала в  $n$ -й камере  $\varphi_n = 43\%$  принадлежит нормированному диапазону  $G_{n=2}^{ydl}$ , а в камере  $n+1$  –  $\varphi_{n+1} = 23\%$  и принадлежит нормированному диапазону  $G_{n+1=3}^{pll}$ . По методу Демпстера–Шафера мера доверия к достижению требуемой влажности на выходе равна 0,123. Осуществим вывод по следующим производственным правилам:

ЕСЛИ  $\Phi_n = \text{ВД}$  И  $\Phi_{n+1} = \text{НВД}$  И  $M_k^k = M$ , ТО  $U^{cl} = \text{СПОН}$ , (0,9)

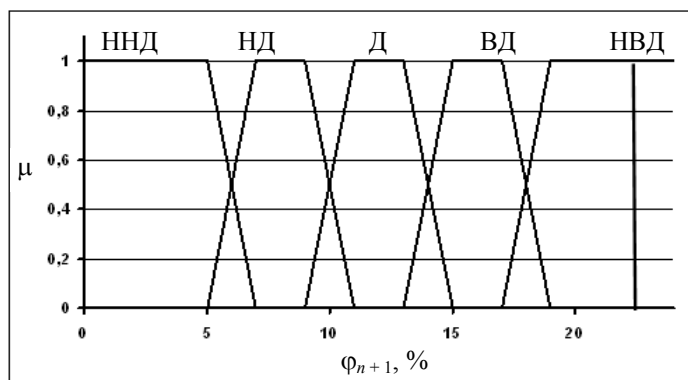
ЕСЛИ  $\Phi_n = \text{Д}$  И  $\Phi_{n+1} = \text{НВД}$  И  $M_k^k = M$ , ТО  $M_k^k = \text{СПОН}$  (0,1)  
(рис. 7.8).

Оптимальное значение  $(\Delta u_o^{cl})^*$ , на которое следует изменить скорость пластинчатого транспортера, определенное согласно функ-

ционалу (2.30), равно  $-0,24$ . Следовательно, скорость пластинчатого конвейера следует понизить, т.е. увеличить время пребывания материала в камерах СВЛ. Новая скорость движения пластинчатого конвейера  $\tilde{u}_0^{сл}$  будет равна  $3,26$  м/ч.

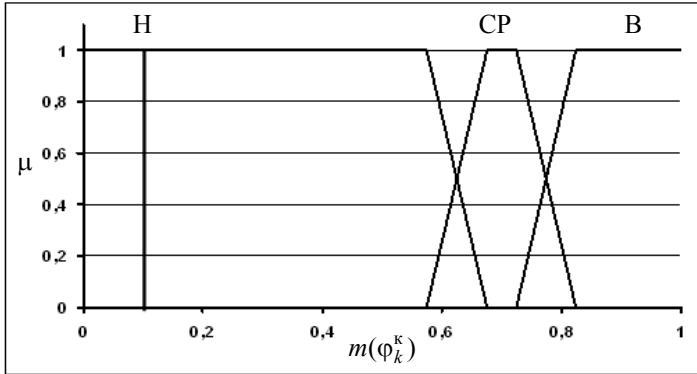


а)

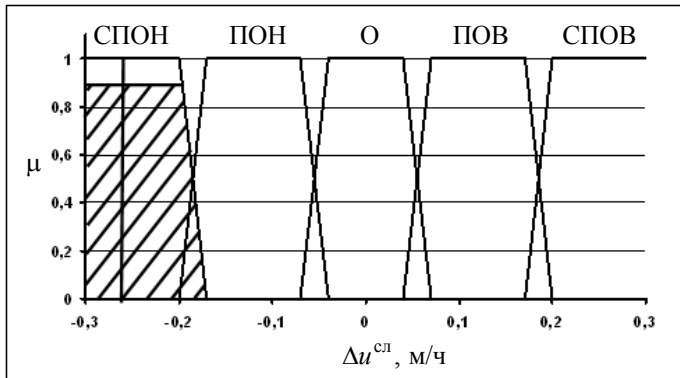


б)

**Рис. 7.8. Значение выходной лингвистической переменной:**  
*a* – «влажность материала на выходе *n*-й камеры»; *б* – «влажность материала на выходе (*n* + 1)-й камеры»; *в* – «мера доверия к достижению требуемой влажности материала на выходе сушилки»;  
*г* – «изменение скорости движения пластинчатого конвейера»



б)



в)

**Рис. 7.8. Окончание**

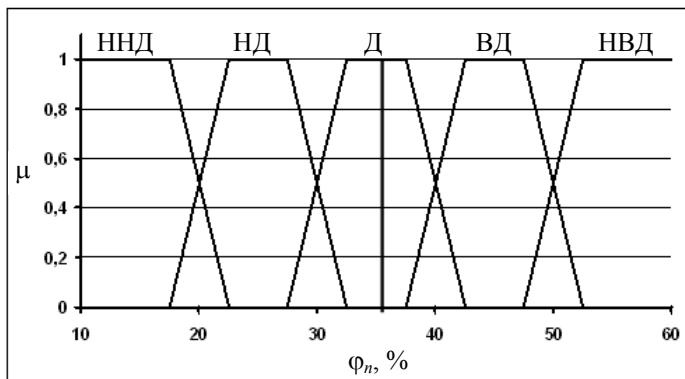
На следующей итерации в результате изменения скорости движения пластинчатого конвейера время пребывания материала увеличилось, и влажность материала в камерах изменилась следующим образом:  $\varphi_{n=2}^K = 37\%$  – принадлежит нормированному интервалу  $G_{n=2}^X$ ,  $\varphi_{n+1=3}^K = 12\%$  – принадлежит нормированному интервалу  $G_{n+1=3}^X$  (табл. 3.1). При этих значениях влажности материала в камерах СВЛ мера доверия к достижению требуемой влажности на выходе  $m(\varphi_k^K) = 0,942$  (табл. 3.3).

Вывод осуществляется по следующему правилу:

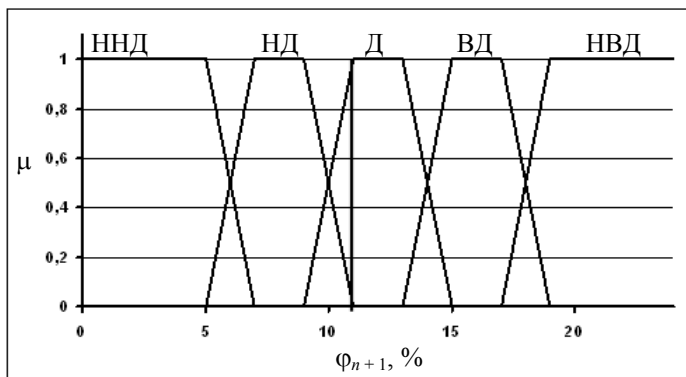
ЕСЛИ  $\Phi_n = Д$  И  $\Phi_{n+1} = Д$  И  $M_k^K = В$ , ТО  $U^{СЛ} = О$ , (рис. 7.9).



Скорость движения пластинчатого конвейера  $\tilde{u}_0^{сл}$  оставлена на прежнем уровне и равна 3,26 м/ч. В результате управления, влажность материала на выходе СВЛ  $\varphi_{k=5}^к$  снизилась с 1,77% до 0,35%.

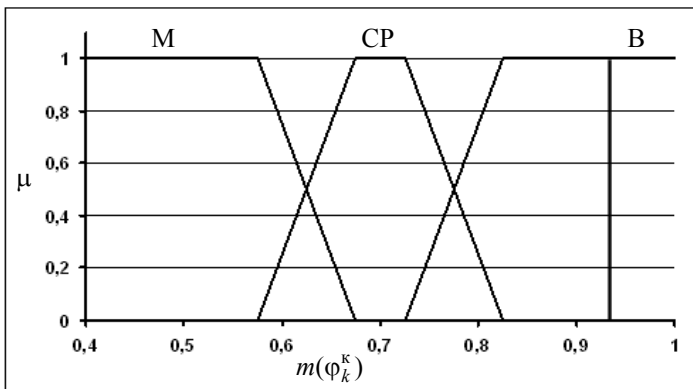


a)

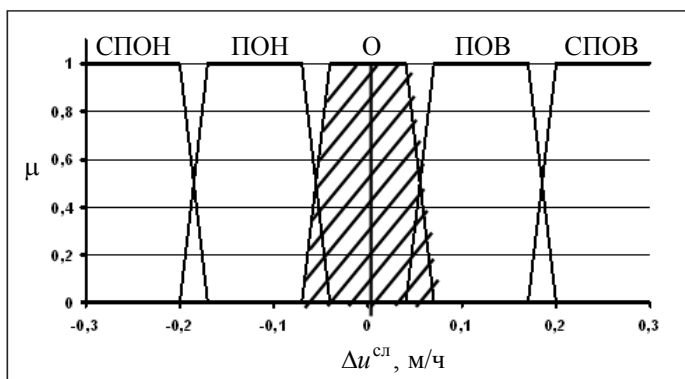


b)

**Рис. 7.9. Значение выходной лингвистической переменной:**  
*a* – «влажность материала на выходе *n*-й камеры»; *б* – «влажность материала на выходе (*n* + 1)-й камеры»; *в* – «мера доверия к достижению требуемой влажности материала на выходе сушилки»;  
*г* – «изменение скорости движения пластинчатого конвейера»



б)



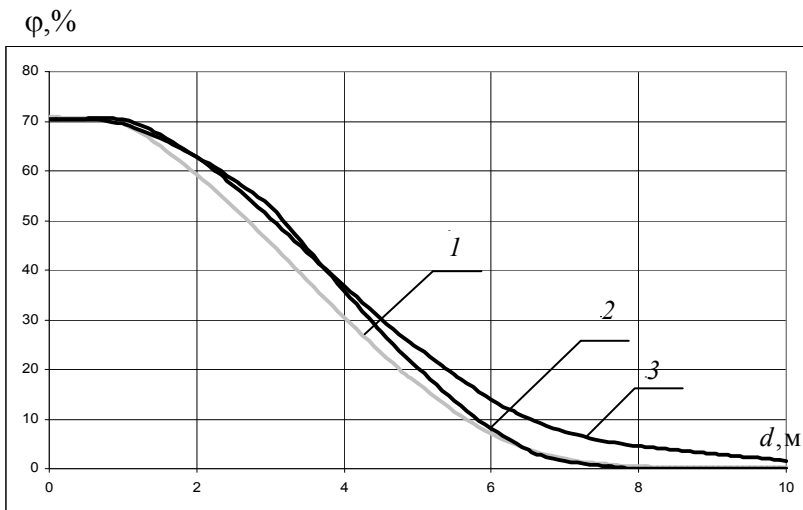
з)

**Рис. 7.9. Окончание**

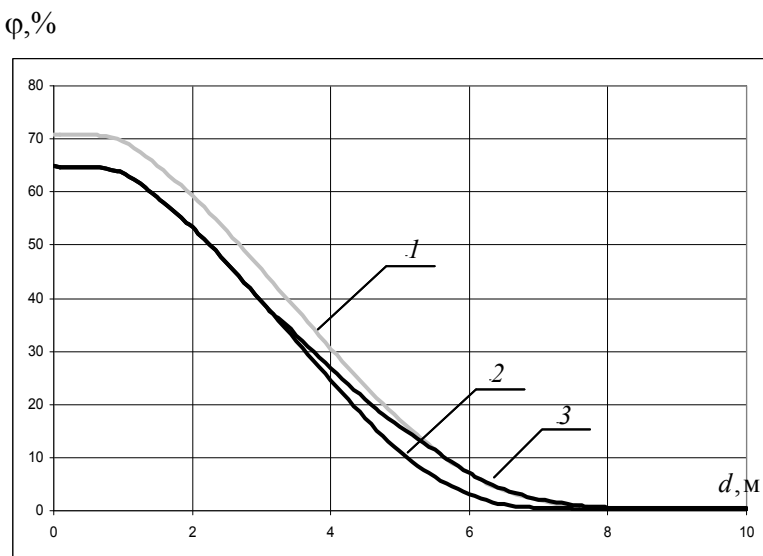
На рисунках 7.10 и 7.11 приведены кинетические кривые изменения влажности материала с понижением и повышением скорости движения пластинчатого конвейера с использованием разработанной ИИУС СВЛ процессами сушки в многосекционных аппаратах соответственно.

Здесь 1 – идеальная кинетическая кривая, 2 – кинетическая кривая с использованием алгоритма управления, 3 – кинетическая кривая без использования алгоритма управления.

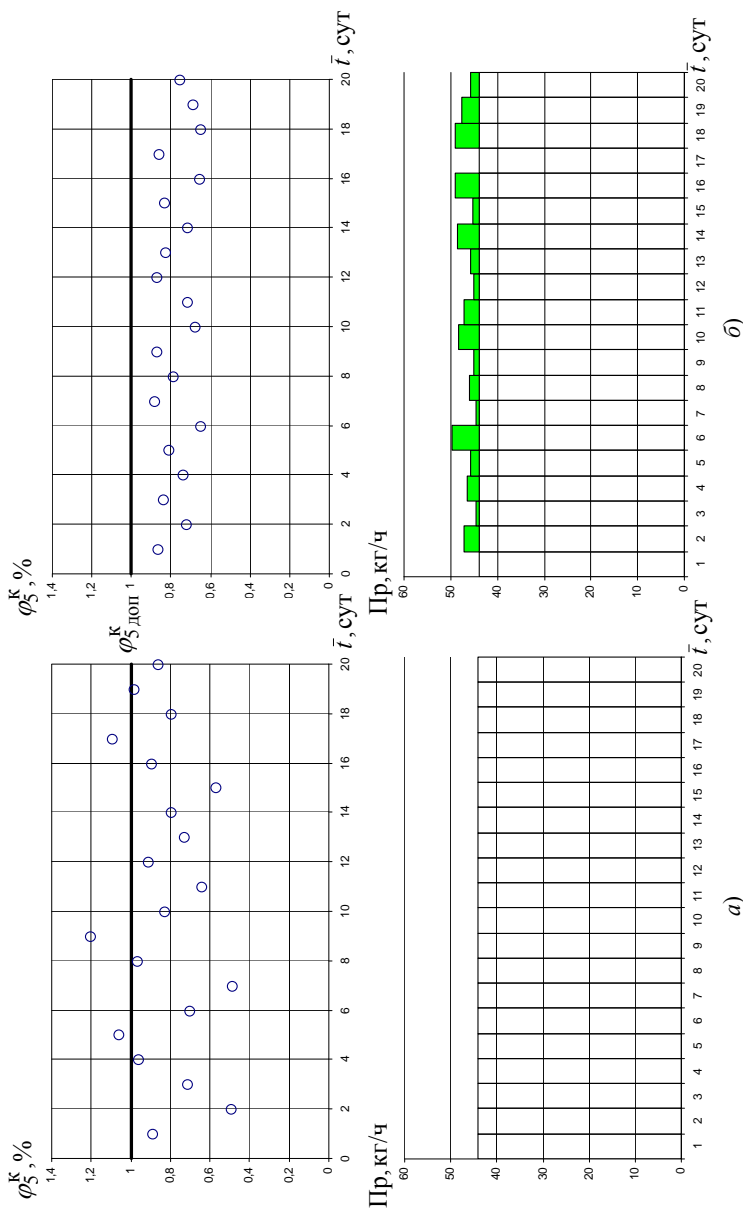
Результаты имитации работы ИИУС СВЛ процессами сушки приведены на рис. 7.12, где показаны значения влажности материала на выходе сушильной установки и производительности процесса сушки без использования информационно-управляющей системы (а) и с ее использованием (б).



**Рис. 7.10. Управление сушкой с понижением скорости движения пластинчатого конвейера**



**Рис. 7.11. Управление сушкой с повышением скорости движения пластинчатого конвейера**



**Рис. 7.12. Основные показатели процесса сушки:**  
*а* – без использования ИИУС СВЛ; *б* – с использованием ИИУС СВЛ

Применение ИИУС СВЛ позволило увеличить вероятность выхода качественной продукции до 0,98, а также повысить производительность процессов сушки на 5%.

### **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 обрабатываются заготовки магнитопроводов различных типоразмеров. Для каждого типоразмера сердечника в печь устанавливается соответствующий ему лоток, и меняется температурный режим, при этом меняется режим отжига и соответственно его продолжительность.

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 имитационных 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 [14].

Математически задачу оптимального управления можно записать в следующем виде: (4.1) – (4.4). Нелинейный объект, описывается множеством моделей,  $M = \{M_1, M_2\}$ , представляющих обыкновенные дифференциальными уравнения вида

$$M_j : \dot{z} = F(z, u, t), \quad F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}, \quad j = 1, 2.$$

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,

$$\dot{z} = F_j(z, u, t), \quad F_j \subset F,$$

- оптимальную управляющую программу

$$u^*(\bullet) = (u^*(t), t \in [t_0, t_k]), \quad (7.4)$$

- 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 [14].

Здесь  $z$  – фазовая координата для объектов первого порядка или  $z = (z_1, z_2)^T$  для объектов второго порядка;  $t_0, t_k$  – начало и конец временного интервала управления;  $u$  – управляющее воздействие.

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, для чего используются два семейства моделей  $M_1$  и  $M_2$ . Одностадийные модели семейства  $M_2$  используются при полностью разогретой печи для смены температуры отжига, например, от 790 °С для Шл 25×32 до 920 °С для Шл 32×40. Здесь при описании процесса нагрева используется аperiodическое 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 в целях 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.

В качестве частей системы оптимального управления, которые независимо друг от друга могут изменять свои состояния функционирования, в нашем случае, можно выделить непосредственно: технологическую установку, напряжение сети, типоразмеры отжигаемых магнитопроводов и окружающую среду (ее температуру).

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. 7.13).

На первом участке (состояние  $h_{1,1}$ ) в интервале температур  $z_{h_{1,1}} \in [10, 355]$  разогреваются сами ТЭНы, на коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  сильнее влияет его конвективная составляющая  $\alpha_k$ , так как  $\alpha_l$  мала. В качестве модели объекта используется дифференциальное уравнение второго порядка.

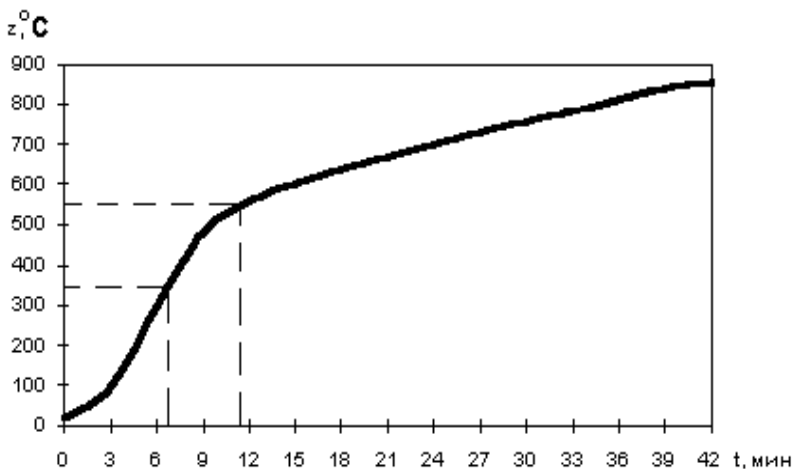


Рис. 7.13. Термограмма нагрева ТОМ-1

На втором участке (состояние  $h_{1,2}$ )  $z_{h_{1,2}} \in [355; 550]$  на коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  существенное влияние оказывает лучистая составляющая  $\alpha_{л}$ , которая становится соизмеримой с конвективной составляющей и может даже превосходить ее.

Третий участок (состояние  $h_{1,3}$ )  $z_{h_{1,3}} \in [550; 850]$  характеризуется существенными потерями в окружающую среду за счет нагревания внешних стенок печи и ее кожуха при  $550^\circ\text{C}$  внутри печи на ее кожухе  $29^\circ\text{C}$ , при  $655\dots35^\circ\text{C}$ ,  $740\dots42^\circ\text{C}$ ,  $850\dots35^\circ\text{C}$ .

Таким образом,  $H_1 = \{h_{1,1}, h_{1,2}, h_{1,3}\}$ .

Так как в печи обрабатываются 16 различных типоразмеров магнитопроводов, то  $H_2 = \{h_{2,1}, h_{2,2}, \dots, h_{2,15}\}$ .

Напряжение питания сети может колебаться в значительных пределах (до 60 В). На основе статистических данных можно выделить три основных 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  $20^\circ\text{C}$ , осенью и весной  $15^\circ\text{C}$ , а зимой  $12^\circ\text{C}$ , тогда  $H_4 = \{h_{4,1}, h_{4,2}, h_{4,3}\}$ .

Значения переменной состояния функционирования  $h$  системы определяются состояниями ее частей, т.е.  $h_v = (h_{1i}, h_{2j}, h_{3k}, h_{4l})$ . Будем



считать, что произошло изменение состояния  $h$ , если изменилось состояние одной из ее компонент. В этом случае МСФ –  $H$  системы можно представить декартовым произведением множеств  $H_i$

$$H = H_1 \times H_2 \times H_3 \times H_4.$$

Учитывая состав множеств  $H_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ , общее число состояний функционирования системы оптимального управления составляет несколько сотен ( $\approx 400$ ).

При проведении анализа МСФ выявлены наиболее вероятные подмножества  $H_v$  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  $H_v$  и  $H_{кр}$  определено подмножество рабочих состояний функционирования  $H_{раб} = H_v \times H_{кр}$ .

На основании проведенного анализа выделены 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:

$$H'_{раб} = \{ h_1 = (H_{1,1}; H_{2,0}; H_{3,2}; H_{4,2}), h_2 = (H_{1,2}; H_{2,0}; H_{3,2}; H_{4,2}), \\ h_3 = (H_{1,3}; H_{2,0}; H_{3,2}; H_{4,2}) \}.$$

В каждом из этих состояний используется своя модель динамики процесса нагрева. Общая модель на множестве  $H'_{раб}$  записывается следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dots \\ \dot{z} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & a_{h_1} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b_{h_1} \end{pmatrix} u(t), z \in [18; 355]; \\ \dots \\ a_{h_2} z(t) + b_{h_2} u(t), z \in [355; 550]; \\ a_{h_3} z(t) + b_{h_3} u(t), z \in [550; 850]. \end{cases} \quad (7.5)$$

Данная модель относится к моделям 3-го класса. Здесь состояние  $h_1$  описывает двойной интегратор с погрешностью  $\Delta_{h_1} = 2$  °С, а состояния  $h_2$  и  $h_3$  – апериодические звенья с различными параметрами.

рами  $a$  и  $b$  и массивами реквизитов, максимальные погрешности которых  $\Delta_{h_2} = 1,3$  °С и  $\Delta_{h_3} = 0,8$  °С соответственно.

Оптимальное управление ищется в виде программы (7.4). 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. 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.

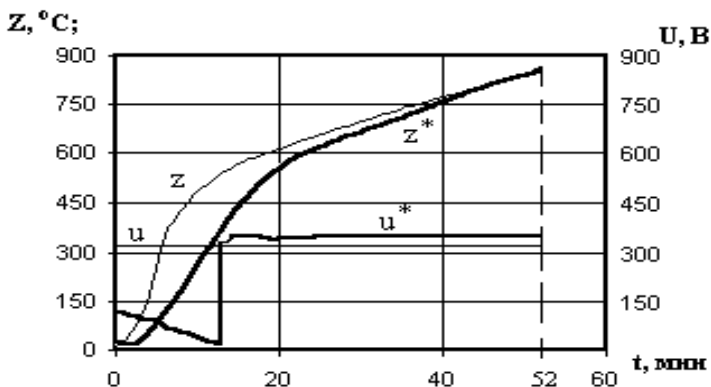
Массив реквизитов для задачи управления, которая решается с использованием модели (55), может быть представлен тремя составляющими:

$$\begin{array}{r}
 a_i \quad b_i \quad u_n \quad u_b \quad t_0 \quad t_k \quad z_0 \quad z_k \\
 R_1(h_1) = (1, \quad 0,045, \quad 0, \quad 350 \quad 0, \quad 7, \quad 18 \quad 355); \\
 R_2(h_2) = (-0,1306 \quad 0,2692, \quad 0, \quad 350, \quad 7, \quad 11, \quad 355, \quad 550); \\
 R_3(h_3) = (-0,014, \quad 0,0556 \quad 0, \quad 350, \quad 11, \quad 42, \quad 550, \quad 850).
 \end{array}$$

В результате решения получена оптимальная программа управления, имеющая вид

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

здесь функция  $\tilde{u}_1^*(t)$  принадлежит области первого вида задачи двойного интегратора, а  $\tilde{u}_2^*(t)$  и  $\tilde{u}_3^*(t)$  – области апериодического звена. Полученная программа снижает энергозатраты на 13% по сравнению с традиционным нагревом при  $u = \text{const}$ , значения  $u^*$  и  $z^*$  приведены на рис. 7.14.



**Рис. 7.14. Температурные зависимости и управляющие воздействия при оптимальном и традиционном управлении процессом нагрева в технологической установке ТОМ-1**

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 °С.

Большие поперечные сечения типов нагревателей обусловлены значительным удельным сопротивлением карбида кремния (800...1500 Ом·мм<sup>2</sup>/м в диапазоне температур на поверхности нагревателя 100...1450 °С), а также недостаточной прочностью в нагретом состоянии.

Электрическое сопротивление нагревателей с повышением температуры до 900...950 °С уменьшается, затем возрастает.

Важнейшим эксплуатационным свойством нагревателей из карбида кремния является постепенное повышение их электрического сопротивления при работе. Это свойство называется старением нагревателей. Исследования [47] 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  $\alpha$ -кристобалита в  $\beta$ -кристобалит, происходящее весьма интенсивно в интервале 150...270 °С 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 электропечи. 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В результате проведенного исследования 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.

1. Разработана методология построения ИИУСистемы, инвариантной различным ТТА, состоящая, в частности, в исполнении этапов: анализа предметной области, постановок задач, моделирования, анализа и синтеза задач управления, алгоритмизации, алгоритмизации синтеза решения задач управления, построения альтернативных архитектур, программной и аппаратной реализации и основанная на применении новой технологии алгоритмизации синтеза, позволяющей оперативно решать задачи управления режимами ТТА по качественным и энергетическим критериям.

2. Разработан метод построения интегрированного графа технологии 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 трудноформализуемых 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 в целях минимизации потерь качества и производительности, учитывающих смену состояния функционирования и влияние большого числа возмущающих воздействий.

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

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

6. Разработан метод сушки пастообразных материалов в многокамерных вальцеленточных сушильных установках с изменением скорости движения пластинчатого конвейера, заключающийся в изменении времени пребывания материала в камерах и позволяющий управлять режимом «Процесс» в целях 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 лимитирующих камерах;

д) синтезированы программы управления энергосберегающие для ТОМ-1 и ресурсосберегающие для СВЛ.

8. Результатом применения разработанной методологии построения ИИУС ТГА 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).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

---

1. **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.
2. **Райцын, Т. М.** Синтез систем автоматического управления методом направленных графов / Т. М. Райцын. – Л. : Энергия, 1970. – 96 с.
3. **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.
4. **Месарович, М.** Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахага. – М. : Мир, 1973. – 340 с.
5. **Артемова, С. В.** Решение задачи структурного построения программного обеспечения интеллектуального датчика влажности / С. В. Артемова // Программные продукты и системы. – 2013. – № 3. – 284 с.
6. **Люггер, Джордж Ф.** Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Джордж Ф. Люггер. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.
7. **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.
8. **Свид.** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 950464. Экспертная система «Энергосберегающее управление динамическими объектами» / Ю. Л. Муромцев, Л. П. Орлова, С. В. Артемова, и др. – Зарег. в РосАПО 19.12.1995.
9. **Муромцев, Ю. Л.** Моделирование и оптимизация сложных систем при изменении состояния функционирования / Ю. Л. Муромцев, Л. Н. Ляпин, О. В. Попова. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1993. – 164 с.
10. **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.
11. **Применение** экспертной системы для анализа и синтеза оптимального управления технологическими процессами / Ю. Л. Муромцев, С. В. Артемова, С. Б. Ушанев, Н. Г. Чернышов // Информацион-



ные технологии в проектировании и производстве. – 1997. – № 1. – С. 12 – 15.

12. **Денисенко, В. В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с.

13. **Норенков, И. П.** Генетические методы структурного синтеза проектных решений / И. П. Норенков // Информационные технологии. – 1998. – № 1. – С. 9 – 13

14. **Артемова, С. В.** Информационная система оптимального управления тепло-технологическими аппаратами: монография / С. В. Артемова. – М.; СПб; Вена; Гамбург: Изд-во МИНЦ, 2011. – 234 с.

15. **Отчет** об исследовательской работе «Разработка мероприятий по снижению энергопотребления и повышению эффективности работы вальце-ленточных сушилок в цехах № 1, 15. – Тамбов, 2001. – 130 с.

16. **Лыков М. В.** Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. – М.: Изд-во «Химия», 1970. – 432 с.

17. **Бутковский, А. Г.** Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975. – 568 с.

18. **Воронов, А. А.** Введение в динамику сложных управляемых систем / А. А. Воронов. – М.: Наука, 1985. – 315 с.

19. **Пат.** 242774 Российская Федерация, МПК F26B17/04, F26B25/22. Способ сушки пастообразных материалов в вальцеленточной сушилке с изменением скорости движения пластинчатого конвейера / 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.

20. **Муромцев, Д. Ю.** Методы и алгоритмы синтеза энергосберегающего управления технологическими объектами: монография / Д. Ю. Муромцев. – Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена: Нобелистика, 2005. – 202 с.

21. **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.

22. **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.

23. **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) : матер. Междунар. конф. – Тамбов, 2003. – Т. 8, вып. 3. – С. 341.

24. **Кафаров, В. В.** Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов. – М. : Наука, 1976. – 499 с.

25. **Пат.** 2444725 Российская Федерация, МПК G01N2500. Способ оценки влажности пастообразного материала в процессе его сушки в вальцеленточной сушильной установке / 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.

26. **Круглов, В. В.** Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.

27. **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.

28. **Центер, Ф. Г.** Проектирование тепловой изоляции электростанций и тепловых сетей / Ф. Г. Центер. – Л. : Энергия, 1972. – 198 с.

29. **Атанс, М.** Оптимальное управление / М. Атанс, П. Л. Фалб : пер. с англ. – М. : Мир. – 1968. – 764 с.

30. **Лейтман, Дж.** Введение в теорию оптимального управления / Дж. Лейтман. – М. : Наука. – 1968. – 192 с.

31. **Сейдж, Э. П.** Оптимальное управление системами / Э. П. Сейдж, Ч. С. Уайт. – М. : Радио и связь. – 1982.

32. **Теория автоматического управления** : учебник для ВУЗов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. 2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / А. А. Воронов, Д. П. Ким, В. М. Лохан и др. ; под ред. А. А. Воронова. – М. : Высшая школа, 1986. – 504 с.

33. **Мастрюков, Б. С.** Теплотехнические расчеты промышленных печей / Б. С. Мастрюков. – М. : Металлургия, 1972. – С. 368.

34. **Справочник** по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М. : Наука, 1987.

35. **Смирнова, В. И.** Проектирование и расчет автоматизированных приводов / В. И. Смирнова, В. И. Разинцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 368 с.

36. **Современное состояние и тенденция развития тиристорных электроприводов переменного тока для краново-подъемных механизмов** / А. Г. Яуре, А. П. Богословский и др. – М. : Информэлектро, 1981.

37. **Файнштейн, В. Г.** Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами / В. Г. Файнштейн, Э. Г. Файнштейн ; под ред. О. В. Снежановского. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.

38. **Информационные** технологии управления : учеб. пособие для вузов / под ред. Г. А. Титоренко. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 439 с.

39. **Артемова, С. В.** Технология построения интеллектуальных информационно-управляющих систем тепло-технологическими аппаратами / С. В. Артемова, А. А. Артемов, П. А. Подхватилин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 561 – 566.

40. **Александров, А. Г.** Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров. – М. : Высшая школа, 1989. – 263 с.

41. **Боггс, Уэнди.** . UML и Rational Rose 2002 / Уэнди Боггс, Майкл Боггс. – М. : Лори, 2004. – 509 с.

42. **Шаллоуей, А.** Шаблоны проектирования. Новый подход к объектно-ориентированному анализу и проектированию / А. Шаллоуей, Дж. Р. Трот. – М. : Издат. дом «Вильямс», 2002. – 288 с.

43. **Карпова, Т. С.** Базы данных: модели, разработка, реализация / Т. С. Карпова. – СПб. : Питер, 2002. – 304 с.

44. **Кренке, Д.** Теория и практика построения баз данных / Д. Кренке. – 8-е изд. – СПб. : Питер, 2003. – 800 с.

45. **Рабинович, С. Г.** Погрешности измерений / С. Г. Рабинович. – Л. : Энергия, 1978. – 262 с.

46. **Артемова, С. В.** Постановка задачи построения информационно-управляющих систем на этапе технического проектирования / С. В. Артемова, А. А. Артемов, В. М. Мелисаров, П. А. Подхватилин // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : тез. докл. 2-й Междунар. конф. с элементами научной школы. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2015. – С. 39–40

47. **Артемова, С. В.** Задача ресурсосберегающего управления динамическими режимами многосекционных сушильных установок / С. В. Артемова, А. Н. Грибков ; под ред. проф. В. М. Тютюнника // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. – Тамбов ; М. ; СПб. ; Баку ; Вена : Изд-во «Нобелистика». – 2005. – Вып. 3, № 196. – С. 142 – 145.

48. **Влияние** режимов работы электропечи на старение и срок службы корбундовых нагревателей / Е. И. Могилевский и др. // Электротермия. – 1969. – Вып. 82. – С. 25 – 27.

Научное издание

АРТЕМОВА Светлана Валерьевна  
АРТЕМОВ Анатолий Анатольевич  
КАМЕНСКАЯ Мария Анатольевна

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ  
СИСТЕМЫ ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
АППАРАТАМИ

Монография

Редактор И. В. Калистратова  
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

ISBN 978-5-8265-1765-9



Подписано в печать 26.09.2017.  
Формат 60×84 /16. 11,39 усл. печ. л.  
Тираж 300 экз. Заказ № 271

Издательско-полиграфический центр  
ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14  
Тел. 8(4752) 63-81-08;  
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru