

*На правах рукописи*

**ГОЛУШКО Сергей Анатольевич**

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ,  
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ  
(на примере топливных печей)**

Специальность: 05.13.07 - Автоматизация технологических  
процессов и производств (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Тамбов 2000

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедре «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем».

Научные руководители: заслуженный деятель науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Муромцев Юрий Леонидович;  
кандидат технических наук, доцент  
Шелохвостов Виктор Прокопьевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Кудинов Юрий Иванович;  
кандидат технических наук, доцент  
Леонтьев Евгений Алексеевич.

Ведущая организация: ВИИТиН, г. Тамбов.

Защита диссертации состоится 29 июня 2000 г. в 13<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета К064.20.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1, ауд. 60.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская 106, ТГТУ, ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан 29 мая 2000 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, доцент



В. М. Нечаев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из основных потребителей газообразного и жидкого топлива на промышленных и других предприятиях являются топливные печи с простейшими системами автоматического регулирования. Рост цен на энергоносители и возможности современной микропроцессорной техники диктуют необходимость создания систем оптимального энергосберегающего управления динамическими режимами печей. Использование таких автоматических систем, решающих задачи синтеза управляющих воздействий в реальном масштабе времени, позволяют экономить до 10 – 20 % жидкого и газообразного топлива.

Данная работа выполнялась в соответствии с научно-техническими программами «Интеллектуальная собственность высшей школы» (1997 г.) и «Ресурсосберегающие технологии машиностроения» (1998), темой хозяйственной НИР ГГТУ 1998 г. № 11-98.

Цель диссертационной работы – разработка математического аппарата для оперативного решения задач анализа и синтеза оптимального управления топливными печами и создание микропроцессорного устройства, обеспечивающего управление динамическими режимами печей с минимумом расхода топлива.

Научная новизна. Предложены модели динамических режимов топливной печи (разогрев, переход на новое заданное значение регулируемой величины, обработка возмущающего воздействия), которые позволяют в реальном времени определять оптимальные управляющие воздействия.

Сформулированы и решены задачи оптимального управления (ЗОУ) топливной печью, учитывающие реальные ограничения на изменения управляющих воздействий. Получены алгоритмы решения ЗОУ для исходных данных, близких к границе области существования оптимального управления.

На защиту выносятся следующие вопросы.

1. Модель динамики топливной печи для решения в реальном времени задач синтеза оптимального управления (ОУ), обеспечивающего экономию топлива в динамических режимах.

2. Алгоритмы оперативного решения задач оптимального управления печами при ограничениях на запас топлива и скорость изменения управляющего воздействия.

3. Алгоритмы синтеза в реальном времени управляющих воздействий для различных режимов работы топливной печи.

4. Автоматическое быстродействующее микропроцессорное управляющее устройство (МПУУ), обеспечивающее синтез оптимального управления для топливной печи при возможных изменениях ЗОУ.

Методы исследования. В работе использованы методы математического моделирования и идентификации сложных динамических объектов, системного анализа, теории оптимального управления и автоматизированного проектирования микропроцессорных систем.

**Обоснованность научных результатов.** Достоверность научных положений и выводов подтверждена и обоснована с помощью корректного использования классических методов анализа и синтеза оптимального управления. Полученные теоретические результаты подтверждены в ходе лабораторных и промышленных испытаний системы энергосберегающего управления промышленной печью с газовой горелкой (КВ-Г-2,5-95).

**Практическая ценность.** Создано микропроцессорное управляющее устройство со специализированной микросхемой, которое в реальном времени рассчитывает программное управление, минимизирующее расход топлива. Разработаны программные модули для автоматизированного решения задач оптимального управления топливными печами.

**Реализация работы.** Результаты решения задач анализа и синтеза оптимального управления использованы при проектировании микропроцессорных систем управления со специализированной микросхемой и программно-аппаратной реализации алгоритма управления топливной печью газовой котельной Тамбовского аграрного колледжа при изменяющихся условиях работы.

Проверка алгоритмов на реальной печи показала, что экономия топлива в различных динамических режимах при оптимальном управлении составляет 10 – 15 %.

**Апробация работы.** Материалы работы доложены на Международной научно-технической конференции и Российской школе молодых ученых и специалистов «Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий» (Сочи, 1998 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Компьютерные технологии в соединении материалов» (Тула, 1998 г.), Международной конференции «Прогрессивная технология и вопросы экологии в гальванотехнике и производстве печатных плат» (Пенза, 1998 г.), втором научно-практическом семинаре «Новые информационные технологии» (Москва, 1999 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Прогрессивная технология и вопросы экологии в гальванотехнике и производстве печатных плат - 99» (Пенза, 1999 г.), IV научной конференции ТГТУ (Тамбов, 1999 г.), V научной конференции ТГТУ (Тамбов, 2000 г.).

**Публикации.** Основное содержание работы опубликовано в 12 публикациях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и четырех приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, отмечена научная новизна, основные положения и результаты, выносимые на защиту. Дана аннотация работы по главам.

В первой главе проведен аналитический обзор научно-технической литературы, посвященной вопросам моделирования динамических режимов

топливных объектов и задач оптимального управления. Рассмотрены основные методы анализа и синтеза оптимального управления, аппаратные средства, используемые в управляющих устройствах. Определены цель и задача исследования.

Во второй главе разработаны модели динамических режимов топливной печи, приведены математические постановки задач оптимального управления с минимумом расхода топлива.

Для решения задач анализа и синтеза оптимального управления модель динамики печей должна удовлетворять следующим требованиям: а) учитывать характерные особенности тепловых процессов в объекте; б) обеспечивать требуемую точность при всех режимах работы; в) позволять оперативно решать задачи анализа и синтеза ОУ.

Для построения модели, удовлетворяющей сформулированным требованиям, использован следующий подход.

1 Выделяются основные части топливной печи, например, камера сгорания, стенки печи и т. д.

2 Составляются уравнения теплового баланса для выделенных частей в виде обыкновенных дифференциальных уравнений.

3 Проводятся эксперименты с целью получения термограмм, характеризующих протекание процессов теплообмена.

4 На основе пп. 2, 3 определяется структура модели в виде системы дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Структура модели характеризуется числом стадий (зон) и видом дифференциальных уравнений каждой зоны.

5 Проводятся эксперименты для оценки параметров и проверки адекватности модели. Если требования адекватности не выполняются, то увеличивается число составных частей и корректируется структура модели.

Разработаны структуры моделей объекта для трех основных динамических режимов работы печи: 1) пуск (разогрев); 2) переходный режим (режим изменения задаваемого значения регулируемой температуры); 3) стабилизация требуемой температуры.

Для топливной печи с газовой горелкой, упрощенная схема которой приведена на рис. 1, структура модели динамики разогрева до заданной (конечной) температуры имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} z_2(t), \\ b_1 u(t) \end{pmatrix}, & z_1 \in [z_1^0, z_1^{n1}), \\ \begin{pmatrix} z_2(t), \\ a_2 z_2(t) + b_2 u(t) \end{pmatrix}, & z_1 \in [z_1^{n1}, z_1^{n2}), \\ \begin{pmatrix} z_2(t), \\ a_3 z_2(t) + b_3 u(t) \end{pmatrix}, & z_1 \in [z_1^{n2}, z_1^{n3}), \\ \begin{pmatrix} z_2(t), \\ a_4 z_1(t) + a_4 z_2(t) + b_4 u(t) \end{pmatrix}, & z_1 \in [z_1^{n3}, z_1^K] \end{cases} \quad (1)$$

здесь  $z = (z_1, z_2)^T$  - вектор фазовых координат,  $z_1$  - температура воды на выходе печи,  $z_2 = \dot{z}_1$ ;  $z_1^0, z_1^K$  - начальная и конечная температуры нагреваемой воды в режиме пуска;  $z_1^{nj}$  - температура «переключения» с  $j$ -ой зоны на  $(j+1)$ -ую,  $j = 1, 2, 3$ ;  $u$  - управление (расход газа);  $a_j, b_j$  - параметры модели для  $j$ -ой зоны,  $j = 1, 4$ .

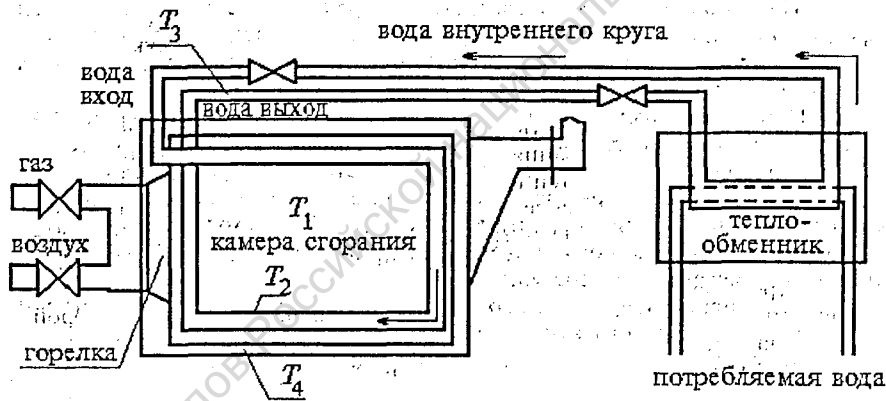


Рис. 1 Упрощенная схема печи:  $T_1$  - температура камеры сгорания;  $T_2$  - температура стенок труб;  $T_3$  - температура нагреваемой воды;  $T_4$  - температура стенок печи

Данная модель получена при следующих допущениях: а) основными частями печи, теплоемкость которых учитывается в модели, являются каме-

ра сгорания, нагреваемая вода, стенки печи и труб; б) данные части рассматриваются как объекты с сосредоточенными параметрами; в) наибольшие скорости изменения температур составных частей разнесены во времени; г) основной компонентой вектора фазовых координат является температура воды на выходе, применительно к которой формулируется задача оптимального управления.

Модель (1) назовем общей, она состоит из четырех частных моделей, отражающих наиболее интенсивно протекающие процессы теплообмена между частями печи на отдельных стадиях. Так как температурные диапазоны каждой стадии невелики, то зависимостями теплофизических характеристик составных частей печи от температуры можно пренебречь и частные модели печи представить линейными дифференциальными уравнениями. Параметры уравнений определяются значениями физических характеристик и размерами составных частей, их взаимным расположением, составом газа и т.д.

На первой стадии частная модель вида двойного интегратора отражает процесс разогрева непосредственно внутреннего пространства камеры сгорания с усредненной температурой  $T_1$  для различных режимов работы (рис. 1). Изменения температур других частей печи здесь незначительны, потери тепла в окружающую среду пренебрежимо малы. На второй стадии происходит интенсивный процесс разогрева стенок труб с нагреваемой водой, температура внутреннего пространства камеры примерно постоянна, потери в окружающую среду через стенки аппарата, как и на первой стадии, пренебрежимо малы. Вторая частная модель имеет вид реального двойного интегратора.

На третьей и четвертой стадиях происходит разогрев воды, стенок аппарата и учитывается теплообмен с окружающей средой, температура стенок труб изменяется незначительно.

После идентификации параметров модели и уточнения температурных диапазонов стадий по экспериментальным данным на реальной печи проверка адекватности модели показала, что она удовлетворяет требуемой точности. Максимальная абсолютная погрешность, вычисляемая по расчетным и сглаженным экспериментальным значениям температуры нагреваемой воды, для всех стадий не превышает  $2^\circ\text{C}$ . Частные модели представляют собой линейные дифференциальные уравнения второго порядка, что позволяет использовать модель (1) для оперативного решения задач оптимального управления.

Задача управления пуском печи с минимумом расхода топлива формулируется как ЗОУ с ограничениями на управление, закрепленными концами траектории изменения фазовых координат и фиксированным временным интервалом управления.

Математически данная ЗОУ записывается в виде: объект, динамика которого описывается моделью (1), требуется на временном интервале

$[t_0, t_k]$  перевести из известного начального состояния  $z(t_0)$  в конечное  $z(t_k)$ , т.е.

$$z(t_0) = z^0 = (z_1^0, z_2^0)^T, \quad z(t_k) = z^k = (z_1^k, z_2^k)^T, \quad (2)$$

при ограничениях на управление и скорость его изменения в каждый момент времени

$$\forall t \in [t_0, t_k]: u(t) \in [u_n, u_b], \quad (3)$$

$$\forall t \in [t_0, t_k]: \frac{du(t)}{dt} \leq g, \quad (4)$$

интегральном на интервале времени  $[t_0, t_k]$

$$\int_{t_0}^{t_k} u(t) dt \leq G \quad (5)$$

и минимуме функционала, характеризующего расход топлива, т.е.

$$J_T = \int_{t_0}^{t_k} f_0(u(t)) dt \rightarrow \min_{u(t)} \quad (6)$$

здесь  $t_0, t_k$  - начало и конец временного интервала управления;  $z^0, z^k$  - начальное и конечное значения вектора фазовых координат;  $u_n, u_b$  - нижняя и верхняя границы изменения управляющего воздействия;  $g$  - допустимая скорость изменения управления, определяемая требованиями к режиму работы горелки и полноте сжигания топлива;  $G$  - выделяемый лимит топлива;  $f_0$  - функция, определяющая вид минимизируемого функционала.

В результате решения ЗОУ определяется оптимальная программа изменения управляющего воздействия

$$u^*(\bullet) = (u^*(t), \quad t \in [t_0, t_k]). \quad (7)$$

Важной особенностью рассматриваемой ЗОУ, (1) - (7) является возможность изменения в некоторый момент времени  $t_h \in [t_0, t_k]$  начальных исходных данных, например,  $t_k, z^k, G$ . В этом случае программа (7) должна оперативно пересчитываться с учетом новых данных для оставшегося временного интервала  $[t_h, t_k]$ .

Аналогично задаче (1) - (7) формулируется задача, связанная с изменением температурного режима работы печи. Эти изменения могут быть вызваны технологическими требованиями, воздействиями внешних факторов и другими обстоятельствами. Для решения данной задачи обычно используются частные модели, соответствующие третьей и четвертой стадиям модели (1).



В случае возникновения отклонения регулируемой температуры от заданного значения, вызванного возмущающим воздействием, решается задача стабилизации, т. е. ЗОУ при устранении данного отклонения с использованием одной частной модели. При этом ограничение (5) не учитывается и время  $t_k$  - не фиксировано.

Основными особенностями рассмотренных задач энергосберегающего управления являются:

1 наличие ограничений на скорость изменения управления в виде неравенства (4) и на лимит топлива в виде (5);

2 положительность границ  $u_n, u_b$  изменения управляющего воздействия в (3), т. е.  $u_b > u_n \geq 0$ ;

3 вид минимизируемого функционала (6) недоопределен, так как использование традиционного функционала типа расход топлива, т. е.  $f_0(u(t)) = u(t)$ , ведет к вырожденности решений ЗОУ.

Определенные трудности в решении задач связаны с видом модели динамики, представляющей собой дифференциальное уравнение с разрывной правой частью.

В третьей главе исследуются вопросы анализа и синтеза оптимального управления с использованием принципа максимума, методов динамического программирования и синтезирующих переменных. В результате этих исследований создано вычислительное пространство, позволяющее для модели динамики (1) оперативно рассчитывать ОУ (7), минимизирующее расход топлива, при выполнении условий и ограничений (2) - (5). Вычислительное пространство позволяет определять возможные виды функций ОУ  $u^*(t)$  для частных моделей, входящих в (1); строить в пространстве синтезирующих переменных  $L_1, L_2$  области существования  $\mathcal{L}_i$  для каждого вида функции ОУ и области  $\mathcal{L}_B, \mathcal{L}_G$ , в которых ЗОУ имеет решение при выполнении ограничений соответственно (4), (5); получать соотношения для расчета параметров ОУ.

При создании вычислительного пространства использован функционал

$$J = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt, \quad (8)$$

при котором, наряду с минимизацией затрат топлива, обеспечивается однозначность видов функций ОУ, эти функции  $u^*(t)$ ,  $t \in [t_0, t_k]$  в пределах интервала  $[u_n, u_b]$  гладкие и практически всегда монотонные, что облегчает выполнение ограничения (4).

Области существования  $\mathcal{L}_i$  видов функций ОУ и характер изменения самих функций  $u^*(t)$  для частных моделей процесса нагрева приведены на рис. 2, а. В качестве координат здесь использованы синтезирующие пере-

менные  $L_1, L_2$ , которые рассчитываются по исходным данным ЗОУ, представляющих собой массив значений  $R = (a_j, b_j, u_n, u_b, z^0, z^x, t_0, t_k)$ , однозначно характеризуют вид функции  $u^*(t)$  и ее параметры. Приведенные на рис. 2, а семь видов функций ОУ имеют место для всех частных моделей:

$$z = A_j z(t) + B_j u(t), \quad j = \overline{1, 4}, \quad (9)$$

$$z = (z_1, z_2)^T, \quad A_j = (a_{kl}(j))_{2 \times 2}, \quad B_j = (0; b_j)^T,$$

в предположении, что собственные числа матриц  $A_j$  действительные и различные. Эти виды функций ОУ называются явными. Для частной модели, соответствующей четвертой стадии разогрева печи, как показали исследования в, так называемом, «напряженном» режиме, при котором  $u^*(t)$  близко к границе  $u_b$ , для определенных значений массива  $R$  функция ОУ может иметь неявный вид  $u_8^*(t)$ . Область существования  $\mathcal{E}_8$  показана на рис 2, б.

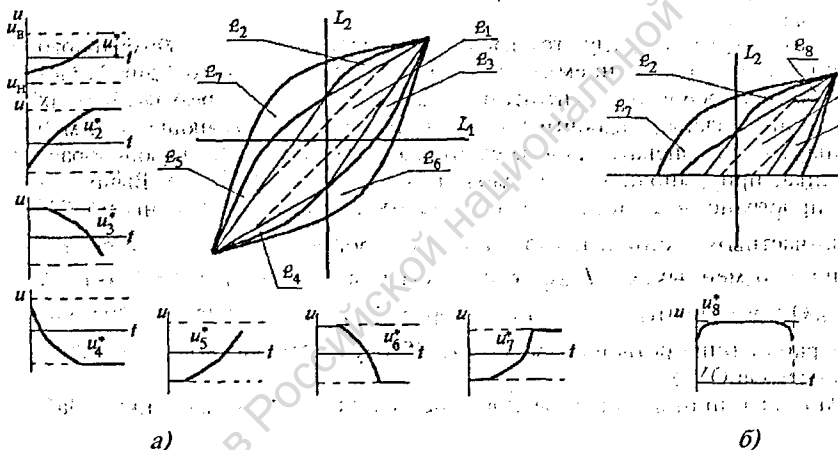


Рис. 2: а - области существования и виды явных функций ОУ;

б - область существования с неявной функцией ОУ  $u_8^*(t)$

Виды функций ОУ для частной модели, соответствующей четвертой стадии (1) и используемой при решении всех трех задач управления (пуск, изменение режима работы и стабилизация), определяются следующей теоремой.

**Теорема 1.** Если решение ЗОУ (1) – (5), (8) существует, значения параметров  $a_2, a_4$  отрицательные, собственные числа  $\lambda_1, \lambda_2$  матрицы  $A_4$  действительные и различные, то при напряженных режимах нагрева в зави-

симости от значений синтезирующих переменных функция ОУ имеет один из следующих видов:

$$u_1^*(t - t_{п3}) = d_0 + d_1 e^{-\lambda_1(t-t_{п3})} + d_1' e^{-\lambda_2(t-t_{п3})}, \quad t \in [t_{п3}, t_k]; \quad (10)$$

$$u_2^*(t - t_{п3}) = \begin{cases} d_0 + d_2 e^{-\lambda_1(t-t_{п3})} + d_2' e^{-\lambda_2(t-t_{п3})}, & t \in [t_{п3}, t_2], \\ u_B, & t \in [t_2, t_k]; \end{cases} \quad (11)$$

$$u_3^*(t - t_{п3}) = \begin{cases} u_B, & t \in [t_{п3}, t_3], \\ d_0 + d_3 e^{-\lambda_1(t-t_{п3})} + d_3' e^{-\lambda_2(t-t_{п3})}, & t \in [t_3, t_k]; \end{cases} \quad (12)$$

$$u_8^*(t - t_{п3}) = \begin{cases} d_0 + d_8 e^{-\lambda_1(t-t_{п3})} + d_8' e^{-\lambda_2(t-t_{п3})}, & t \in [t_{п3}, t_8], \\ u_B, & t \in [t_8, t_8], \\ d_0 + d_8 e^{-\lambda_1(t-t_{п3})} + d_8' e^{-\lambda_2(t-t_{п3})}, & t \in [t_8, t_k]; \end{cases} \quad (13)$$

здесь  $d_i, d_i', i = 1-3; 8; t_2, t_3, t_8, t_8'$  - параметры соответствующих функций оптимального управления;  $t_{п3}$  - время «переключения», соответствующее значению  $z_1^{п3}$  (1).

Для доказательства теоремы используются принцип максимума и метод синтезирующих переменных.

Функция  $u_8^*(t - t_{п3})$  имеет место лишь при определенных исходных данных ЗОУ.

*Теорема 2.* Функция ОУ  $u_8^*(t - t_{п3})$  имеет место только при выполнении следующих условий:

$$0 < T_m = \frac{\lambda_1}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} \ln \left( -\frac{d_1' \lambda_2}{d_1 \lambda_1} \right) < 2, \quad (14)$$

$$d_1 e^{\lambda_1 \frac{2T_m}{t_k - t_{п3}}} + d_1' e^{\lambda_2 \frac{2T_m}{t_k - t_{п3}}} > \frac{u_B - u_H}{2}, \quad (15)$$

а область  $\mathcal{E}_8$  существования функции  $u_8^*(t - t_{п3})$ , если условия (14), (15) выполняются, «появляется» в верхней части области  $\mathcal{E}_1$  (рис. 2, б).

В пространстве синтезирующих переменных построены области  $\mathcal{E}_g$ , в которых выполняется ограничение (4). Исследования показали, что наиболее критичными в отношении скорости изменения управления при разогреве печи являются первые три стадии, когда имеет место функция ОУ первого вида (рис. 2, а). Для первой стадии границы области  $\mathcal{E}_{1g}$  в пределах  $\mathcal{E}_1$  определяются уравнениями:

$$L_2(1) = L_1(1) - \frac{2g}{3} \frac{u_B - u_H}{t_{п1} - t_0}, \quad L_2(1) = L_1(1) + \frac{2g}{3} \frac{u_B - u_H}{t_{п1} - t_0}, \quad (16)$$

а для второй и третьей стадий:

$$L_2(j) = \varphi_1(\bar{a}_j)L_1(j) - \varphi_2(\bar{a}_j)g, \quad L_2(j) = \varphi_1(\bar{a}_j)L_1(j) + \varphi_2(\bar{a}_j)g, \quad (17)$$

$$j = 2, 3; \quad \bar{a}_j = a_j \frac{t_{пj} - t_{пj-1}}{2}; \quad \varphi_1(\bar{a}_j) = \frac{e^{2\bar{a}_j} - 1}{2\bar{a}_j};$$

$$\varphi_2(\bar{a}_j) = \left(1 - \bar{a}_j - (1 + \bar{a}_j)e^{-2\bar{a}_j}\right) \frac{1 - e^{2\bar{a}_j}}{2\bar{a}_j^2},$$

здесь  $t_{пj}$  - момент времени, при котором  $z_1(t_{пj}) = z_1^{пj}(1)$ .

Значения синтезирующих переменных в (16), (17) рассчитываются по формулам:

$$L_1(1) = \frac{4(z_2^{п1} - z_2^0)}{b_1(u_B - u_H)} - 2 \frac{u_B + u_H}{u_B - u_H},$$

$$L_2(1) = \frac{8(z_1^{п1} - z_1^0)}{b_1(u_B - u_H)(t_{п1} - t_0)^2} + \frac{8z_2^{п1}}{b_1(u_B - u_H)(t_{п1} - t_0)} - 2 \frac{u_B + u_H}{u_B - u_H},$$

$$L_1(j) = -8 \frac{\bar{a}_j(z_1^{пj} - z_1^{пj-1})}{b_j(u_B - u_H)(t_{пj} - t_{пj-1})^2} + 4 \frac{z_2^{пj} - z_2^{пj-1}}{b_j(u_B - u_H)(t_{пj} - t_{пj-1})} - 2 \frac{u_B + u_H}{u_B - u_H},$$

$$L_2(j) = 4 \frac{z_2^{пj} - z_2^{пj-1} e^{2\bar{a}_j}}{b_j(u_B - u_H)(t_{пj} - t_{пj-1})} - \frac{(e^{2\bar{a}_j} - 1)(u_B + u_H)}{\bar{a}_j(u_B - u_H)}, \quad j = 2, 3.$$

Границы области  $\mathcal{L}_{1g}$  показаны на рис. 2, а пунктирными линиями.

Для области  $\mathcal{L}_G$  границы находятся подстановкой в (5) функций  $u_i^*(t)$ , параметры которых выражены через синтезирующие переменные. Например, для первой стадии при ОУ  $u_1^*(t)$  область  $\mathcal{L}_G$  определяется неравенством

$$|L_1(1)| \leq \frac{4G_1 - 2(u_H + u_B)(t_{п1} - t_0)}{(u_B - u_H)(t_{п1} - t_0)},$$

здесь  $G_1$  - допустимое количество топлива для первой стадии нагрева печи, определяемое распределением общего лимита  $G$ .

По выделенным областям  $\mathcal{L}_g$  и  $\mathcal{L}_G$ , строится область  $\mathcal{L}_{огр}$ , в которой выполняются ограничения (4) и (5), т.е.  $\mathcal{L}_{огр} = \mathcal{L}_g \cap \mathcal{L}_G$ .

На основе выполненного анализа ОУ разработан алгоритм синтеза оптимального управления, которое для модели (1) имеет вид:

$$u^*(\bullet) = (u_{(1)}^*(t - t_0), t \in [t_0, t_{n1}^*]; u_{(2)}^*(t - t_{n1}^*), t \in [t_{n1}^*, t_{n2}^*]; \\ u_{(3)}^*(t - t_{n2}^*), t \in [t_{n2}^*, t_{n3}^*]; u_{(4)}^*(t - t_{n3}^*), t \in [t_{n3}^*, t_k]), \quad (18)$$

где  $u_{(j)}^*(t - t_{nj-1}^*)$  - функция ОУ для  $j$ -ой стадии;  $t_{nj}^*$  - оптимальное значение времени окончания  $j$ -ой стадии,  $j = 1, 2, 3$ .

Оптимальные значения времен «переключения»  $t_{nj}^*$ ,  $j = 1, 2, 3$  рассчитываются методом динамического программирования, а виды функций  $u_{(j)}^*(t - t_{nj-1}^*)$  и их параметры определяются методом синтезирующих переменных.

Разработаны алгоритмы расчета оптимального управления для каждой стадии нагрева. Применительно к четвертой стадии алгоритм включает следующие этапы.

1 Проверяется выполнение условия существования решения ЗОУ. Для этого по массиву исходных данных  $R = (a_4, a_4, b_4, g, G, u_n, u_b, z_1^{n3}, z_2^{n3}, z_1^k, z_2^k, t_{n3}, t_k)$  рассчитываются значения синтезирующих переменных  $L_1, L_2$ . Если точка с координатами  $(L_1, L_2)$  расположена между внешними границами  $\mathcal{L}_6, \mathcal{L}_7$  (рис. 2, а), то решение ЗОУ для задаваемого массива  $R$  существует. В противном случае корректируются значения  $z_2^{n3}, t_{n3}, t_k$ .

2 Определяется вид функции ОУ по принадлежности точки  $(L_1, L_2)$  одной из областей  $\mathcal{L}_i$ . Если  $(L_1, L_2) \in \mathcal{L}_1$ , то проверяется выполнение условий (14), (15), необходимых для существования функции  $u_8^*(t - t_{n3})$ .

3 По аналогии с первым этапом проверяется выполнение ограничений (4) и (5), для этого должно выполняться условие  $(L_1, L_2) \in \mathcal{L}_{отр}$  в соответствующей области  $\mathcal{L}_i$ , при необходимости значения  $z_2^{n3}, t_{n3}, t_k$  корректируются.

4 Рассчитываются параметры функции ОУ. Вместо функции  $u_8^*(t - t_{n3})$  удобно в вычислительном отношении использовать квазиоптимальное управление

$$\bar{u}_8(t - t_{n3}) = \begin{cases} \bar{u}_8, & t \in [t_{n3}, \bar{t}_8], \\ u_b, & t \in [\bar{t}_8, t_k], \end{cases}$$

здесь параметры  $\bar{u}_8, \bar{t}_8$  определяются из соотношений

$$\bar{u}_8 = \frac{1}{2}(u_n + u_b + U_8(u_b - u_n)), \quad \bar{t}_8 = t_{п3} + \frac{t_k - t_{п3}}{2} T_8,$$

$$T_8 = \frac{1}{\Lambda_1} \ln \left( 1 + \frac{(e^{\Lambda_1 T_8} - e^{2\Lambda_1} + \Lambda_1 L_1)(e^{\Lambda_2 T_8} - 1)}{e^{\Lambda_2 T_8} - e^{2\Lambda_2} + \Lambda_2 L_2} \right),$$

$$\Lambda_i = \frac{\lambda_i}{(t_k - t_{п3})}, \quad i = 1, 2; \quad U_8 = \frac{\Lambda_1 L_1 + e^{\Lambda_1 T_8} - e^{2\Lambda_1}}{e^{\Lambda_1 T_8}}$$

Рассмотренный алгоритм составляет основу математического обеспечения микропроцессорной системы оптимального управления температурными режимами топливной печи.

Наиболее трудоемкие с точки зрения вычислительных операций и объема занимаемой памяти в алгоритме являются расчеты, связанные с определением видов функций оптимального управления, так как для этого приходится запоминать и использовать в расчетах сложные соотношения, определяющие границы областей  $\mathcal{E}_i$ ,  $\mathcal{E}_g$  и  $\mathcal{E}_G$ .

В четвертой главе рассматриваются вопросы проектирования и реализации систем оптимального управления топливными печами. В задаче проектирования к микропроцессорному управляющему устройству предъявлялись следующие требования.

1 Микропроцессорное устройство управления должно обеспечивать синтез оптимальных управляющих воздействий в реальном времени для задач пуска, изменения заданий и стабилизации температурных режимов.

2 При изменении исходных данных  $R$ , необходимых для решения ЗОУ, на временном интервале управления  $[t_0, t_k]$  МПУУ должно за допустимое время пересчитывать ОУ, т. е. реализовывать корректируемую программную стратегию на множестве состояний функционирования.

3 В МПУУ должна быть предусмотрена возможность изменения программного обеспечения, вызванного коррекцией общей модели динамики, в т. ч. числа стадий видов и параметров частных моделей, а также допустимых значений  $g$  (4) и  $G$  (5).

Наряду с этим МПУУ должно быть недорогим и надежным.

С учетом этих требований при проектировании устройства управления температурными режимами печи использовались:

1 алгоритмы, которые могут быть реализованы управляющим устройством; в состав алгоритмов входят соотношения для границ областей существования оптимального управления, соотношения для определения вида функций ОУ, формулы для расчета параметров;

2 интервальные значения параметров общей модели динамики объекта (1);

3 ограничения по быстродействию, стоимости и габаритам;

4 возможные варианты архитектуры микропроцессорного управляющего устройства.

В результате анализа ряда структурных схем предложена архитектура микропроцессорного устройства (рис. 3) со специализированной микросхемой (СМС). Устройство с такой архитектурой обладает высоким быстродействием при использовании дешевого маломощного микропроцессора. Специализированная микросхема в МПУУ выполняет наиболее трудоемкие операции расчета оптимального управления – определение вида функции ОУ.

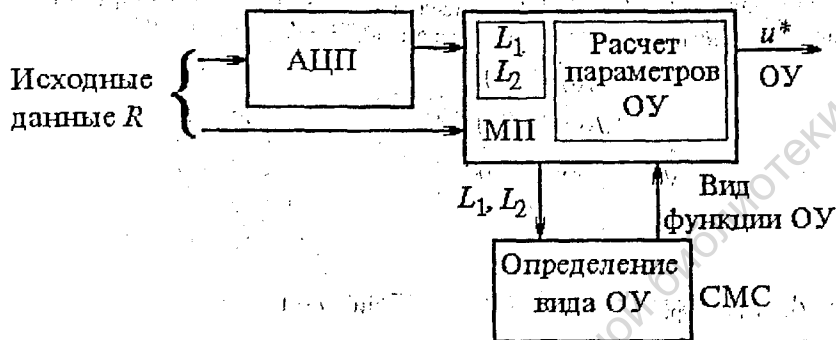


Рис. 3 Структурная схема устройства управления со специализированной микросхемой

Разработанная микросхема конструктивно выполнена в алюминиевом корпусе и включает кристаллы, реализующие «графическое» изображение областей  $L_i$ ,  $L_g$  и  $L_G$  для всех стадий процесса нагрева. Особенности данной конструкции являются: совмещение функций подложки и корпуса; первоначальное изготовление платы корпуса с выполненными внешними выводами; многослойная разводка. Непосредственно на внутренней поверхности подложки выполнены пассивные пленочные элементы. Бескорпусные активные элементы с шариковыми выводами монтируются на контактных площадках, выведенных на верхний выравнивающий слой. Данная конструкция обеспечивает допустимые тепловые режимы и требуемую надежность межэлементных связей.

Алгоритм синтеза оптимального управления данным МПУУ с такой микросхемой (рис. 3) заключается в следующем:

- 1 по массиву исходных данных  $R$  микропроцессор рассчитывает значения синтезирующих переменных  $L_1$  и  $L_2$ , которые передаются на вход специализированной микросхемы;
- 2 по полученным значениям синтезирующих переменных микросхема вырабатывает сигнал, характеризующий вид функции оптимального управления;
- 3 для выделенного вида функции микропроцессор рассчитывает значения параметров ОУ.

Предложенная аппаратная реализация устройства управления учитывает особенности алгоритма синтеза оптимального управления и обеспечивает увеличение быстродействия в два раза по сравнению с традиционным МПУУ.

Данное МПУУ использовано для управления печью с газовой горелкой (рис. 1). На рис. 4, а представлены термограммы нагрева печи при традиционном и энергосберегающем управлении. Соответствующие графики изменения управляющего воздействия приведены на рис. 4, б. Рассчитанное оптимальное управление для режима пуска имеет следующий вид:

$$u^*(t) = \begin{cases} d_0(1) + d_1(1)t, & t \in [t_0, t_{п1}^*), \\ d_0(2) + d_1(2)e^{a_2(t-t_{п1}^*)}, & t \in [t_{п1}^*, t_{п2}^*), \\ d_0(3) + d_1(3)e^{a_2(t-t_{п2}^*)}, & t \in [t_{п2}^*, t_{п3}^*), \\ \bar{u}_g, & t \in [t_{п3}^*, t_8), \\ u_B, & t \in [t_8, t_k), \end{cases}$$

где  $d_0(j)$ ,  $d_1(j)$  - параметры ОУ для  $j$ -ой стадии,  $j = 1, 2, 3$ .

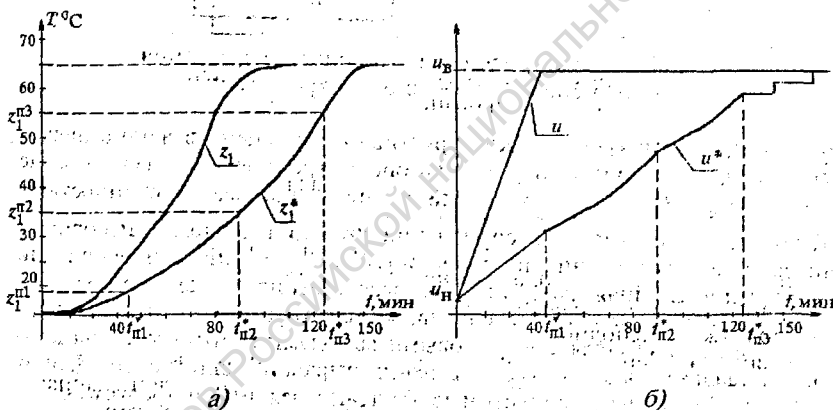


Рис. 4 Температурные зависимости (а) и управляющие воздействия (б) при оптимальном и традиционном управлении пуском топливной печью

Использование МПУУ позволяет снизить расход топлива в динамических режимах на 11 – 15 %. Основными факторами, обеспечивающими экономию, являются: синтез ОУ в реальном времени при всех возможных изменениях исходных данных ЗОУ; алгоритмическое обеспечение, позволяющее рассчитывать оптимальные управляющие воздействия для динамических режимов пуска, изменения заданий и стабилизации регулируемой температуры.

Возможности МПУУ позволяют решать ЗОУ при дефиците топлива, обеспечивать нагрев до требуемой температуры к точно заданному моменту



времени (за счет чего снижаются потери тепла в окружающую среду), применять меры организационного характера, например, устанавливать определенные температурные режимы в зависимости от времени суток, погодных условий и т. д. Кроме того, оптимальное управление с минимизацией расхода топлива повышает безаварийность работы и снижает загрязненность окружающей среды.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Разработаны математические модели, учитывающие различные динамические режимы работы топливной печи. Предложена методика построения математических моделей динамики для топливных объектов в виде дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, предназначенных для оперативного решения задач анализа и синтеза оптимального управления в динамических режимах.

Сформулированы и решены задачи оптимального управления топливной печью с учетом особенностей реальных тепловых процессов – нелинейности модели динамики, ограничения на скорость изменения управляющего воздействия, лимит топлива. Получены алгоритмы синтеза оптимального управления при пуске, изменении заданий, стабилизации регулируемой температуры для исходных данных, близких к границе области существования оптимального управления.

Разработано и реализовано автоматическое микропроцессорное управляющее устройство со специализированной микросхемой, обеспечивающей синтез в реальном времени управляющих воздействий для топливной печи с газовой горелкой.

Использование данного устройства позволяет экономить в динамических режимах до 15 % топлива, повысить безопасность функционирования и уменьшить вредные выбросы в окружающую среду.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах

1 Голушко С. А., Муромцев Ю. Л., Шелохвостов В. П. Специализированные микросхемы для энергосберегающих управляющих устройств // Компьютерная хроника. – Москва, 1997. – № 12. – С. 65 – 71.

2 Голушко С. А., Муромцев Ю. Л. Специализированная микросхема для энергосберегающих управляющих устройств // Труды молодых ученых и студентов ТГТУ. – Тамбов, 1997. – С. 158 – 162.

3 Голушко С. А., Шелохвостов В. П. Технология изготовления специализированной микросхемы для энергосберегающих устройств // Труды ТГТУ. – Тамбов, 1998. – С. 130 – 134.

4 Голушко С. А., Муромцев Ю. Л., Шелохвостов В. П. Элементная база для энергосберегающих управляющих устройств // Материалы Международной научно-технической конференции и Российской научной школы «Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий». – Москва-Сочи, 1998. – Ч. 4. – С. 14 – 15.

5. Голушко С. А. Проблемы синтеза оптимального управления // Материалы второго научно-практического семинара «Новые информационные технологии». — Москва, 1999. — С. 109 - 111.

6. Брусенцов Ю. А., Голушко С. А., Шелохвостов В. П. Исследование технологии низкоомных резисторов на керамических платах // Материалы Международной конференции «Прогрессивная технология и вопросы экологии в гальванотехнике и производстве печатных плат». — Пенза, 1998. — С. 74 - 75.

7. Голушко С. А., Сучков В. Г., Шелохвостов В. П. Оптимальное управление процессами сварки // Материалы II-ой Всероссийской научно-технической конференции «Компьютерные технологии в соединении материалов». — Тула, 1998. — С. 87 - 88.

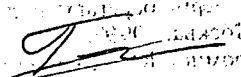
8. Голушко С. А. Некоторые проблемы синтеза оптимального управления // IV научная конференция ТГТУ. — Тамбов, 1999. С. 120 - 121.

9. Голушко С. А., Сучков В. Г., Шелохвостов В. П. Специализированная микросхема для устройств оптимального управления // Вестник ТГТУ. — Тамбов, 1999. — №4. — С. 530 - 536.

10. Голушко С. А., Шелохвостов В. П. Исследование процесса изготовления микросхем на металлических платах // Конференция «Прогрессивная технология и вопросы экологии в гальванотехнике и производстве печатных плат - 99». Пенза, 1999. С. 25 - 27.

11. Орлова Л. П., Голушко С. А. Об одном способе повышения быстродействия систем энергосберегающего управления // Труды ТГТУ. — Тамбов, 2000 - Вып. 5. — С. 33 - 38.

12. Голушко С. А., Беляев С. В. Алгоритм синтеза энергосберегающего управления устройством со специализированной микросхемой // V научная конференция ТГТУ. — Тамбов, 2000. — С. 248 - 249.



---

ЛР № 020851 от 27.09.99 П.лр № 020079 от 28.04.97  
Подписано в печать 26.05.2000  
Гарнитура Times ET. Формат 60 x 84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Объем: 0,93 усл. печ. л.; 0,9 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз. С. 445

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

РНБ Русский фонд

2008-4

8061

Из фондов Российской национальной библиотеки



16 ИЮН 2000