

АНАЛИЗ И ОПЕРАТИВНЫЙ СИНТЕЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗОННЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПЕЧАМИ

И.В. Тюрин (ГТУ)

Рассматриваются проблемы анализа и оперативного синтеза ресурсосберегающего управления энергоемкими объектами и основные пути их решения. Предложен подход, основанный на новом математическом аппарате анализа и синтеза оптимального управления для объектов с распределенными параметрами на примере многозонной печи производства терморезисторов. Приведены описание модели динамики печи, фрагменты полного анализа и синтеза оптимального управления, а также основные результаты внедрения разработанных математических моделей и алгоритмов на производстве.

Развитие отечественной промышленности в условиях рыночной экономики тесно связано с внедрением передовых информационных технологий, обновлением производственного оборудования, использованием современных принципов управления производством. Весь комплекс указанных мер, направленных на обновление (реинжиниринг) [1] существующих процессов и создание новых, позволяет выпускать спектр продукции, сравнимый с аналогами известных зарубежных фирм. Проблема энергосбережения в последние годы вышла на одно из первых мест в вопросах обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции при минимальной ее себестоимости. Одним из путей решения указанных проблем, является оптимальное управление энергоемкими объектами.

Многозонные печи с электронагревом широко используются в радиоэлектронной промышленности, например, для термической обработки заготовок терморезисторов. Такие печи являются типичными объектами с распределенными параметрами и имеют ряд особенностей. К ним прежде всего относятся большие затраты энергии, высокие требования к поддержанию пространственно-временных температурных режимов, сильные связи между переменными состояниями в соседних участках печи, значительное число управляющих и возмущающих воздействий, жесткие ограничения на изменения составляющих вектора фазовых координат, вероятность выхода из строя отдельных нагревательных элементов в процессе эксплуатации печи. Система автоматического управления печью должна обеспечивать решение сложных задач для реализации резервов по снижению энергозатрат и уменьшению доли брака выпускаемой продукции.

Традиционное снижение энергетических затрат на производстве в процессах нагрева достигается за счет повышения производительности технологического оборудования, уменьшения его простоев в рабочем состоянии, а также повышения надежности электротермических аппаратов и улучшения теплоизоляции [2].

Важным резервом снижения энергопотребления печей является оптимальное управление (ОУ) переходными режимами с учетом начальных условий и запаздывания. Большинство существующих алгоритмов управления не учитывают теплоаккумулирующие способности конструкции аппаратов с электронагревом и неточность задания начальных условий, что ведет к перерасходу энергии в динамических режимах. Теоретические исследования показывают, что при опти-

мальном управлении нагревом уменьшение затрат энергии в динамических режимах может находиться в пределах 10...25 % по сравнению с традиционным управлением. Кроме того, энергосберегающее управление характеризуется плавным протеканием тепловых процессов, а это ведет к повышению долговечности и безопасности эксплуатации оборудования.

Однако следует заметить, что алгоритмы, реализующие классическую идеологию оптимального адаптивного управления, сложны и непригодны для использования их в простых и дешевых контроллерах. Компромисным вариантом может служить применение в системе управления ЭВМ с соответствующим алгоритмическим обеспечением, но в настоящее время такие системы автоматического управления печами не выполняют функции синтеза энергосберегающих управляющих воздействий в масштабе РВ. Поэтому практически во всех появившихся на международном рынке микропроцессорных системах и индивидуальных контроллерах произошел возврат к традиционным ПИД алгоритмам регулирования. Принципиально новым в этих системах было появление модулей автоматизированной настройки, однако заложенные в этих модулях алгоритмы кардинально отличались от предсказываемых теорией. К настоящему времени господствующее положение заняли два подобных метода.

1. Экспертные методы автоматизированной настройки (например, EXACT — алгоритм американской фирмы Foxboro и сходные алгоритмы контроллеров японских фирм Yokogawa и Hitachi), учитывающие рекомендации опытных экспертов-наладчиков, осуществляющих настройку подачей на действующую систему автоматического регулирования ступенчатых воздействий и анализирующих затем характер получаемой реакции на такие воздействия.

2. Автоматизированный вариант эмпирического метода настройки Зиглера — Никольса, основанный на выводе действующей системы с П регулятором на границу устойчивости и расчете по критическим периодам колебаний и коэффициенту передачи регулятора оптимальных параметров настройки ПИД регулятора с использованием для этого простых эмпирических формул. Автоматизация метода состоит в замене настраиваемого регулятора двухпозиционным реле, что приводит к возникновению установившихся автоколебаний в контуре регулирования. На таком принципе работают блоки автонастройки контроллеров типа Ремиконт и Протар.

В двух этих методах не удалось реализовать адаптивное оптимальное управление, которое, по самому определению этого термина, должно обеспечить слежение параметров настройки за непрерывно меняющимися свойствами объекта; успешно реализована лишь автоматизированная настройка параметров регулятора, осуществляемая только при практически неизменных во время настройки свойствах объекта.

Выходом из данной ситуации может служить подход, использующий новый математический аппарат анализа и синтеза оптимального управления, основанного на принципе максимума и методе синтезирующих переменных, однозначно определяющих вид и параметры функций оптимального управления [3]. Введение синтезирующих переменных позволяет оперативно решать как прямые, так и обратные задачи управления. Под обратными понимаются задачи коррекции компонентов массива параметров объекта, при которых достигаются желаемые значения синтезирующих переменных и необходимые результаты решения прямой задачи, например, уменьшение значения функционала.

Вышеизложенный подход использовался при создании системы оптимального энергосберегающего управления многозонными тепловыми объектами на ФГУП "Тамбовский завод "Октябрь" и многозонной прецизионной печию на ОАО "Котовский завод "Алмаз".

В качестве объекта управления рассматривалась n -зонная электрическая печь, упрощенная схема которой приведена на рис. 1. Внутри печи движется платформа с обрабатываемыми заготовками. Температуры T_i , $i = \overline{1, n}$ в каждой зоне управляются напряжениями u_i , $i = \overline{1, n}$, подаваемыми на нагревательные элементы (ТЭНы).

Цель проводимых исследований заключалась в решении комплекса задач анализа и синтеза ОУ электрическими тепловыми многозонными объектами с учетом взаимного влияния зон печи и запаздывания, возможности изменения критерия оптимальности, ограничений и режимных параметров в зависимости от производственной ситуации. Кроме того, требовалось создание математического и алгоритмического обеспечения для недорогих микропроцессорных устройств, синтезирующих в РВ ресурсосберегающие управляющие воздействия.

Для решения задач оптимального управления (ЗОУ) функционированием печей требуются математические модели, адекватно описывающие протекающие в них динамические процессы. Так как многозонные печи являются типичными объектами с распределенными параметрами, то модель динамики должна отражать изменение температуры во времени в каждой точке печи, а также учитывать возможные отказы нагревательных элементов [4].

Проведение полного анализа ОУ предполагает решение следующего ряда задач: 1) определение всех возможных видов синтезирующих функций; 2) нахождение областей существования видов синтезиру-

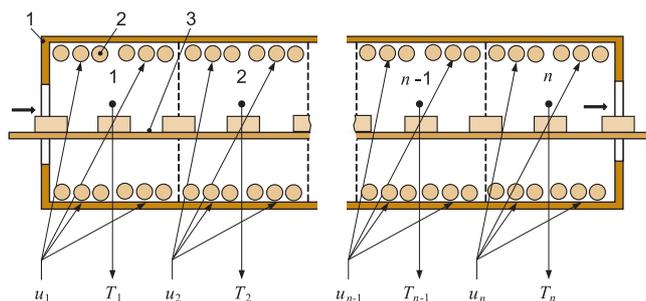


Рис. 1. Схема n -зонной электрической печи: 1 – каркас печи, 2 – нагревательные элементы, 3 – движущаяся платформа с заготовками

ющих функций и соотношений для расчета их параметров; 3) определение условий устойчивости замкнутой системы ОУ; 4) получение соотношений (для границ областей), выполнение которых обеспечивает соблюдение наложенных ограничений на вектор фазовых координат x и скалярное управляющее воздействие u ; 5) исследование влияния режимных параметров регулирования и, прежде всего, временного интервала квантования на показатели эффективности системы управления. Основу исследований составляет полный анализ ОУ для частных задач управления.

Задачу управления одной зоной печи на одном температурном интервале для конкретного функционала, стратегии реализации ОУ и ограничений на значения фазовых координат будем называть частной ЗОУ, обозначим $\langle M_{ik}, F, S, O \rangle$, где M_{ik} – модель динамики для i -ой зоны на k -м температурном интервале, F – минимизируемый функционал, S – стратегия реализации ОУ, O – ограничения. При полном анализе частной ЗОУ $\langle M_{ik}, F, S, O \rangle$ определяются условия существования решения задачи, возможные виды функций ОУ (синтезирующих функций), соотношения для расчета параметров ОУ и границ областей различных видов ОУ. Решением является оптимальная с точки зрения затрат энергии ($F = \mathcal{E}$) программа управления объектом $u_i^*(\cdot)$ ($S = \text{Пр}$), модель динамики которого представлена дифференциальным уравнением.

Таким образом, в результате предварительного полного анализа ОУ для четверок $\langle M_{ik}, F, S, O \rangle$ создается база знаний для оперативного анализа и синтеза энергосберегающего управления.

Синтез оптимального управления является заключительным этапом проектирования АСУ печью [5]. Исходными данными служат диапазоны возможных изменений параметров объекта, границ управляющих воздействий, начального и конечного значений вектора фазовых координат, границ динамического запаздывания по каналу управления и возмущения, начало и конец временного интервала, т.е. результаты идентификации модели динамики объекта, представленные в виде массива реквизитов, а также модели ЗОУ, представленной в виде четверки $\langle M_{ik}, F, S, O \rangle$. В состав модели ЗОУ включаются формулы расчета синтезирующих переменных, соотношения для опре-

деления границ областей видов ОУ, формулы для расчета параметров ОУ, траекторий изменения фазовых координат и значений функционалов.

Задачу синтеза управляющих воздействий в масштабе РВ, решаемую микроконтроллером, применительно к частной ЗОУ, можно сформулировать следующим образом. По известному фрейму модели ЗОУ $\langle M_{ik}, F, S, O \rangle$ для заданного массива исходных данных за допустимое время требуется проверить наличие решения ЗОУ, если оно существует, определить вид функции ОУ и рассчитать ее параметры. Если решения ЗОУ не существует, то необходимо решить обратную задачу по коррекции компонентов массива исходных данных и расчету ОУ для откорректированного массива с выдачей информационного сообщения оператору об изменении исходных данных.

Задача синтеза ОУ разогревом печи является исключительно сложной и решается на ЭВМ одновременно для всех зон и температурных интервалов печи. Для ее решения задается массив реквизитов, включающий значения всех параметров модели, температурные и временные границы стадий разогрева.

Разработанные математические модели и алгоритмы использованы в системе управления многозонной электрической печью, предназначенной для прецизионной обработки заготовок терморезисторов в воздушной среде. В канале печи шесть контролируемых и регулируемых зон ($n = 6$), потребляемая мощность 80кВт, максимальная температура печи 1400°C, напряжение питающей сети ~380 В, скорость проталкивания изделий 0,3...1 м/ч, габаритные размеры печи 8200x1800x2300 мм. В печи осуществляется косвенный нагрев заготовок карборундовыми (карбидокремниевыми) стержнями марки КЭНА 18/250/400, в каждой зоне устанавливается 12 стержней.

Для обеспечения требуемой точности внутри каждой зоны выделялось несколько стадий (по характеру изменения термограммы). Например, для второй рабочей зоны определено четыре стадии, соответствующие темпе-

ратурным интервалам [20...277), [277...783), [783...994), [994...1100) и была решена задача $\langle M_2, F, S, O \rangle$. По результатам решения получены значения синтезирующих переменных и функция оптимального управления. На рис. 2 представлен вид полученной функции ОУ.

Отладка и тестирование разработанного алгоритма производились с помощью SCADA-системы Трейс Моуд. Микропроцессорное управляющее устройство реализовано на микроконтроллере ATMEL AT89.

Экономия затрат энергии за счет использования оптимальной программы на данной стадии разогрева составляет примерно 12%. Проведенные исследования на ФГУП "Тамбовский завод "Октябрь" позволили снизить расход электроэнергии многозонных тепловых систем в динамических режимах на 12...15%, а

также снизить процент брака выпускаемой продукции. За счет использования разработанных моделей и алгоритмов в системе управления печью ОАО "Котовский завод "Алмаз" экономия энергоресурсов в динамических режимах на канал печи составляет 8...10%, коэффициент выхода изделия СТ-15-3 возрос на 10...15%.

Список литературы

1. Степанов С.А., Тюрин И.В. Методика гибридного эксперимента на начальных этапах обновления технологического процесса // Тр. ТГТУ. 2002. Вып. 11.
2. Ятров С.Н. Энергосберегающие технологии в СССР и за рубежом. Аналитический альбом. М.: Мир, 1991.
3. ПонTRYгин Л.С., Болтынский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко С.В. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука. 1969.
4. Тюрин И.В. Информационная система идентификации моделей объектов с распределенными параметрами // Информационные системы и процессы: Сб. науч. тр. /Под ред. проф. В.М. Тютюника. – Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена: Нобелистика, 2004. Вып. 2.
5. Муромцев Д.Ю., Муромцев Ю.Л., Орлова Л.П. Синтез энергосберегающего управления многостадийными процессами комбинированным методом // Автоматика и телемеханика. 2002. №3.

Тюрин Илья Вячеславович – начальник сектора автоматизации проектирования кафедры "Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем" Тамбовского государственного технического университета. Контактный телефон (0752) 72-94-17. E-mail: tyrinilja@crems.jesby.tstu.ru

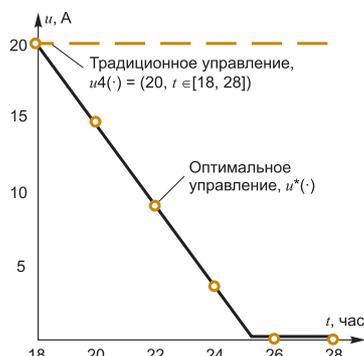


Рис. 2. Традиционный и оптимальный разогрев печи на 4-й стадии 2-й зоны

Система комплексного многокомпонентного дозирования сдана в эксплуатацию

Специалистами фирмы "ИнСАТ-СПб" на ОАО "Волховский комбикормовый завод" введена в эксплуатацию АСУ комплексным многокомпонентным дозированием. Устаревшая технология производства по принципу непрерывного дозирования и смешивания заменена на дискретную. Благодаря применению микропроцессорных дозирующих контроллеров Мастер 210.1, обеспечивающих возможность дозирования малых порций на ленточных дозаторах, переход на новую технологию производства осуществлен без замены оборудова-

ния дозаторов непрерывного действия. Также реализован новый подход к процессу дробления компонентов — дозирование осуществляется в две очереди по принципу гранулометрического состава компонентов в рецепте.

Внедрение новой технологии позволило повысить точность дозирования, улучшить качество дробления и смешивания компонентов. В качестве системы верхнего уровня применена Master SCADA, которая имеет встроенные средства управления рецептами.

[Http://www.insat.ru](http://www.insat.ru)