

УДК 681.5.013

© 2009 г. **А.Н. Грибков**, канд. техн. наук
(Тамбовский государственный технический университет)

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ В МНОГОСЕКЦИОННЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Рассмотрены вопросы проектирования информационно-управляющих систем динамическими режимами в многозонных объектах на примере многосекционной сушильной установки.

Ключевые слова: информационно-управляющая система, оптимальное управление, многосекционная сушильная установка.

Введение

Важной задачей современной промышленности является снижение энергопотребления технологическими установками с целью уменьшить себестоимость и повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Процессы сушки играют существенную роль в промышленном производстве как по энергопотреблению, так и по влиянию на качество выпускаемой продукции. Основными особенностями многосекционных сушильных установок как объектов управления являются: большие затраты энергоресурсов, высокие требования к точности поддержания требуемых температурных режимов, необходимость учета взаимного влияния секций друг на друга, наличие случайных возмущений в каналах управления и измерения и т.д.

Для учета этих особенностей информационно-управляющая система (ИУС) должна реализовывать алгоритмы, позволяющие идентифицировать текущее состояние функционирования объекта и оперативно реагировать на изменения основных параметров процесса. Поэтому при разработке математического и алгоритмического обеспечения ИУС широко применяются алгоритмы адаптивного, робастного управления, а также методы искусственного интеллекта.

Теоретические вопросы анализа и синтеза ресурсосберегающего управления динамическими режимами сушильных аппаратов при наличии внешних возмущающих воздействий и жестких ограничений на качество выпускаемой продукции в настоящий момент исследованы недостаточно, поэтому данная задача является актуальной.

Формализация и математическая постановка задачи оптимального управления сушильной установкой

В качестве объекта управления рассматривается конвективная сушильная установка вальце-ленточного типа (СВЛ), упрощенная схема которой приведена на рис. 1.

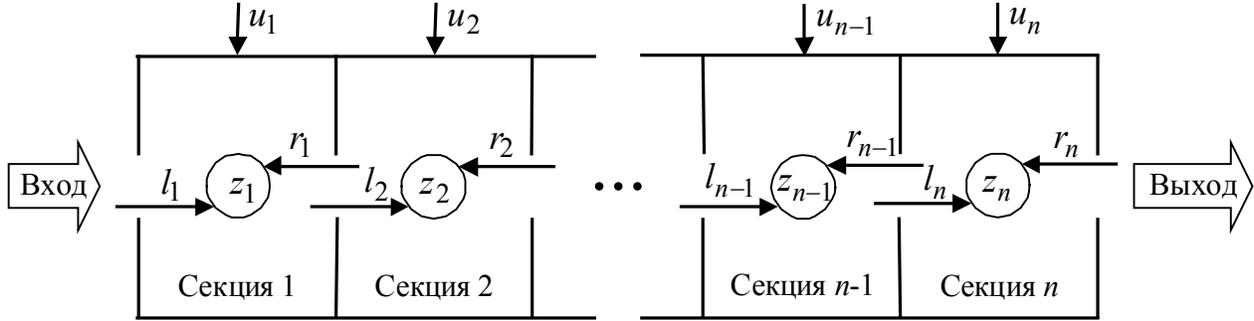


Рис. 1. Упрощенная схема n -секционной СВЛ.

Здесь $z_i, i = \overline{1, n}$ – температура в центре i -й секции ($^{\circ}\text{C}$); u_i – управляющее воздействие (степень открытия крана подачи пара, %); l_i, r_i – возмущающие воздействия со стороны соседних секций СВЛ слева и справа.

Исходя из конструктивных и технологических соображений, каждая секция (зона) рассматривается как локальный многостадийный объект с сосредоточенными параметрами, описываемый системой дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Модель i -й зоны записывается в виде

$$M_i : \dot{z}_i = \begin{cases} A_i^1 z_i^1(t) + B_i^1 u_i^1(t) + C_i^1 l_i^1(t) + D_i^1 r_i^1(t), & z_i^1 \in [z_0^1, z_k^1]; \\ A_i^2 z_i^2(t) + B_i^2 u_i^2(t) + C_i^2 l_i^2(t) + D_i^2 r_i^2(t), & z_i^2 \in [z_0^2, z_k^2]; \\ \dots & \dots \\ A_i^{m_i} z_i^{m_i}(t) + B_i^{m_i} u_i^{m_i}(t) + C_i^{m_i} l_i^{m_i}(t) + D_i^{m_i} r_i^{m_i}(t), & z_i^{m_i} \in [z_0^{m_i}, z_k^{m_i}], \end{cases}$$

$$l_i^j(t) = z_i^j(t) - z_{i-1}^j(t), \quad r_i^j(t) = z_i^j(t) - z_{i+1}^j(t), \quad (1)$$

где $A_i^j, B_i^j, C_i^j, D_i^j, j = \overline{1, m_i}, i = \overline{1, n}$ – матрицы параметров для j -й стадии i -й зоны; z_i^j – вектор фазовых координат; z_0^j, z_k^j – границы j -й стадии.

Важным этапом формализации задачи оптимального управления (ОУ) является введение множества состояний функционирования СВЛ. В качестве факторов, влияющих на изменение состояния функционирования, можно выделить: внутренние, связанные с изменением вида и параметров моделей динамики секций СВЛ, и внешние (наличие или отсутствие шумов в каналах управления и измерения; возможные значения давления пара, подаваемого в калориферы; изменения температуры окружающей среды и т.д.).

Таким образом, общую математическую модель сушильной установки на множестве состояний функционирования можно представить множеством моделей [1]

$$\mathbf{M}^h = \left\{ M_i^{h_p}, i = \overline{1, n}, h_p \in \mathbf{H} \right\}, h \in \mathbf{H},$$

где $M_i^{h_p}$ – модель i -й секции в состоянии h_p ; h – переменная состояния функционирования; \mathbf{H} – множество состояний функционирования СВЛ.

При проектировании информационно-управляющей системы очень важно учитывать шумы в каналах управления и измерения, так как они оказывают существенное влияние на точность поддержания режимных параметров и эффект энергосбережения.

Математическую постановку задачи ресурсосберегающего управления динамическими режимами СВЛ в обобщенном виде можно записать следующим образом:

$$\dot{\mathbf{Z}} = f_1(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{Z}, \mathbf{U}, \mathbf{W}, \mathbf{L}, \mathbf{R}, h, t), \quad (2)$$

$$\mathbf{Y} = f_2(\mathbf{Q}, \mathbf{Z}, \mathbf{V}, h, t), \quad (3)$$

$$\mathbf{Z}(t_0) = \mathbf{Z}_0 \rightarrow \mathbf{Z}(t_k) = \mathbf{Z}_k, \quad (4)$$

$$\forall t \in [t_0, t_k]: \mathbf{U}(t) \in [\mathbf{U}_H, \mathbf{U}_B], \quad (5)$$

$$J = \int_{t_0}^{t_k} |\mathbf{U}(t)| dt \rightarrow \min_{\mathbf{U}}, \quad (6)$$

где $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ – матрицы параметров модели объекта; $\mathbf{Z}, \mathbf{Y}, \mathbf{U}$ – векторы фазовых координат, выходных переменных и управляющих воздействий; \mathbf{W}, \mathbf{V} – векторы шумов в каналах управления и измерения; \mathbf{L}, \mathbf{R} – векторы возмущающих воздействий со стороны соседних секций СВЛ; \mathbf{Q} – матрица параметров измерения; $\mathbf{Z}_0, \mathbf{Z}_k$ – начальное и конечное значения вектора фазовых координат (могут задаваться интервальными значениями); $[t_0, t_k]$ – временной интервал управления; $\mathbf{U}_H, \mathbf{U}_B$ – границы изменения вектора управляющих воздействий; J – минимизируемый функционал вида расход топлива.

Необходимо перевести объект, представленный моделями (2), (3), из начального состояния \mathbf{Z}_0 в конечное \mathbf{Z}_k (см. (4)) за фиксированный интервал времени при ограничении на управляющие воздействия (5), с минимумом функционала (6) и с учетом текущего состояния функционирования h .

Алгоритмическое обеспечение информационно-управляющей системы

Для разработки алгоритмического обеспечения ИУС был проведен анализ оптимального управления на множестве состояний функционирования с учетом влияния шумов и разработаны алгоритмы оперативного синтеза управляющих воздействий, которые позволяют достичь цели управления с минимумом затрат энергоресурсов.

Анализ оптимального управления охватывает широкий круг задач, связанных с исследованиями вопросов существования решения задачи ОУ, определения возможных видов функций оптимального управления и др. Для решения задач

анализа и синтеза использовался математический аппарат принципа максимума и метода синтезирующих переменных.

На основе результатов анализа разработаны алгоритмы оперативного синтеза управляющих воздействий.

Алгоритмическое обеспечение ИУС включает следующий набор алгоритмов оптимального управления:

1. Алгоритм ОУ, использующий программную стратегию (PR-алгоритм). При программной стратегии рассчитывается оптимальная траектория изменения управляющего воздействия в зависимости от значений компонентов массива исходных данных задачи:

$$u^*(t) = s^{pr}(t, R).$$

Конкретный вид синтезирующей функции s^{pr} выбирается по результатам анализа ОУ.

2. Алгоритм ОУ с позиционной стратегией (PZ-алгоритм). При позиционной стратегии управления определяется синтезирующая функция, устанавливающая связь между управляющим воздействием $u^*(t)$ и выходной переменной $y(t)$ с учетом оставшегося времени $t_k - t$:

$$u^*(t) = s^{pz}(y(t), t_k - t, R).$$

Вид синтезирующего оператора s^{pz} определяется при помощи метода синтезирующих переменных.

3. Алгоритм ОУ с фильтром Калмана (FK-алгоритм) [2]. Данный алгоритм является разновидностью PZ-алгоритма, в котором для снижения влияния шумов в канале измерения вместо значения выходной переменной $y(t)$ в алгоритм расчета ОУ подставляется оценка вектора фазовых координат $\hat{z}(t)$, получаемая при помощи фильтра Калмана:

$$u^*(t) = s^{pz}(\hat{z}(t), t_k - t, R).$$

4. Алгоритм ОУ с прогнозирующей моделью (PM-алгоритм) [3]. Этот алгоритм применяется для снижения влияния шумов в канале управления, для чего в формулу расчета управляющего воздействия вводится компенсационная добавка $\tilde{w}(t)$, определенная путем оптимального прогноза:

$$u^*(t) = s^{pr}(t, R) - \tilde{w}(t).$$

Прогнозирующая модель $\tilde{w}(t)$ выбирается с учетом требуемой точности прогноза.

5. Алгоритм ОУ с нечеткой логикой (FL-алгоритм) [4]. Алгоритм с корректируемой стратегией управления, в которой за счет весового коэффициента выбирается оптимальное сочетание управляющих воздействий, использующих различные стратегии, по следующей формуле:

$$u^*(t) = \alpha u^{pz}(t) + (1 - \alpha) u^{pr}(t),$$

где $u^{pz}(t)$ – позиционное; $u^{pr}(t)$ – программное управление; α – весовой коэффициент, подбираемый с использованием теории нечетких множеств в зависимости от отклонения значений вектора синтезирующих переменных от расчетного

$$\Delta\Lambda = |\Lambda - \Lambda_p|.$$

Коэффициент α определяется значением нечеткой переменной λ по следующим продукционным правилам:

λ_1 : если $\Delta\Lambda = \Lambda_B$, то стратегия – позиционная ($\alpha = 1$);

λ_2 : если $\Delta\Lambda \in [\Lambda_H, \Lambda_B]$, то стратегия – корректируемая (α определяется при помощи алгоритма нечеткого вывода);

λ_3 : если $\Delta\Lambda = \Lambda_H$, то стратегия – программная ($\alpha = 0$),

где Λ_H, Λ_B – граничные значения $\Delta\Lambda$.

Программное и аппаратное обеспечение информационно-управляющей системы

Разработка программного обеспечения ИУС производилась в рамках спиральной модели жизненного цикла информационных систем. При проектировании и разработке программного обеспечения ИУС использовались CASE-средства Erwin 4.0 и VPwin 4.0, а также среда быстрой разработки приложений Borland Developer Studio 2006.

Структурная схема ИУС представлена на рис. 2. Система включает четыре модуля, базу знаний, машину вывода, базу данных и подсистему пользовательского интерфейса.

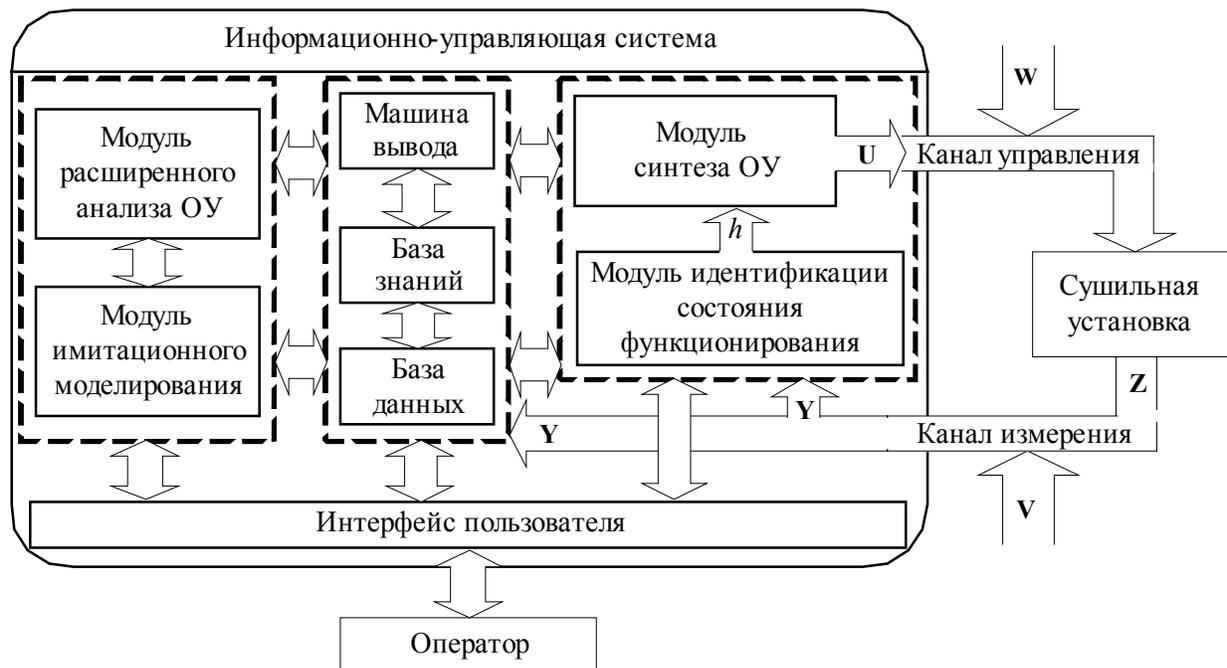


Рис. 2. Структурная схема ИУС.

Модуль расширенного анализа ОУ обеспечивает получение условий существования решения задачи ОУ, определение всех возможных видов функций ОУ, нахождение границ областей видов функций, получение соотношений для расчета параметров функций ОУ при различных интенсивностях шумов в каналах

управления и измерения.

Модуль имитационного моделирования осуществляет имитирование влияния шумов и смены состояния функционирования объекта, планирование эксперимента и получение статистических данных по заданному количеству опытов.

Модуль идентификации состояния функционирования позволяет идентифицировать текущее значение переменной состояния функционирования СВЛ.

Модуль синтеза ОУ реализует процедуры оперативного синтеза управляющих воздействий в зависимости от текущего состояния функционирования СВЛ.

Ядром ИУС являются фреймовая база знаний и реляционная база данных. В базе знаний хранятся процедурные знания в виде фреймов, реализующих алгоритмическое обеспечение ИУС. База данных предназначена для хранения исходных данных и результатов работы ИУС. Функции системы управления базой данных реализованы в программных модулях ИУС.

Аппаратное обеспечение ИУС включает:

технические средства канала управления (клапаны для плавного регулирования подачи пара в калориферы каждой секции сушильной установки; электроприводы для автоматического регулирования степени открытия штока клапанов подачи пара);

технические средства канала измерения (датчики, предназначенные для измерения температуры в секциях сушильной установки; измерительные приборы, которые обеспечивают передачу информации о значениях температуры с датчиков к ЭВМ через интерфейс RS232);

персональный компьютер с установленными программными модулями, базой данных и базой знаний ИУС.

Пример работы информационно-управляющей системы

В качестве примера рассмотрим результаты работы ИУС для управления четвертой секцией пятисекционной СВЛ. Ее модель имеет вид

$$M_4 : \begin{pmatrix} z_{41}^1 \\ z_{42}^1 \\ \hline z_{41}^2 \\ z_{42}^2 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0,225 & -0,376 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{41}^1(t) \\ z_{42}^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,177 \end{pmatrix} u_4^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,132 \end{pmatrix} l_4^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,451 \end{pmatrix} r_4^1(t), z_{41}^1 \in [20;58), \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0,149 & -0,094 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{41}^2(t) \\ z_{42}^2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,052 \end{pmatrix} u_4^2(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,672 \end{pmatrix} l_4^2(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,096 \end{pmatrix} r_4^2(t), z_{41}^2 \in [58,7;71,4]. \end{cases}$$

Графики оптимального управления для четвертой секции СВЛ приведены на рис. 3.

Экономия энергоресурсов при оптимальном управлении для четвертой секции составила 6,2 % по сравнению с традиционным, при этом было обеспечено требуемое качество выпускаемой продукции.

Заключение

В статье рассмотрены основные этапы разработки алгоритмического и программного обеспечения информационно-управляющей системы динамическими

режимами сушильных установок вальце-ленточного типа.

Использование разработанных алгоритмов оптимального управления в ИУС позволяет снижать затраты энергоресурсов на 5-10 % без ухудшения качества выпускаемой продукции.

Информационно-управляющая система внедрена на ОАО «Пигмент» (г. Тамбов) и применяется для управления динамическими режимами процессов сушки красителей, входящих в состав типографской краски.

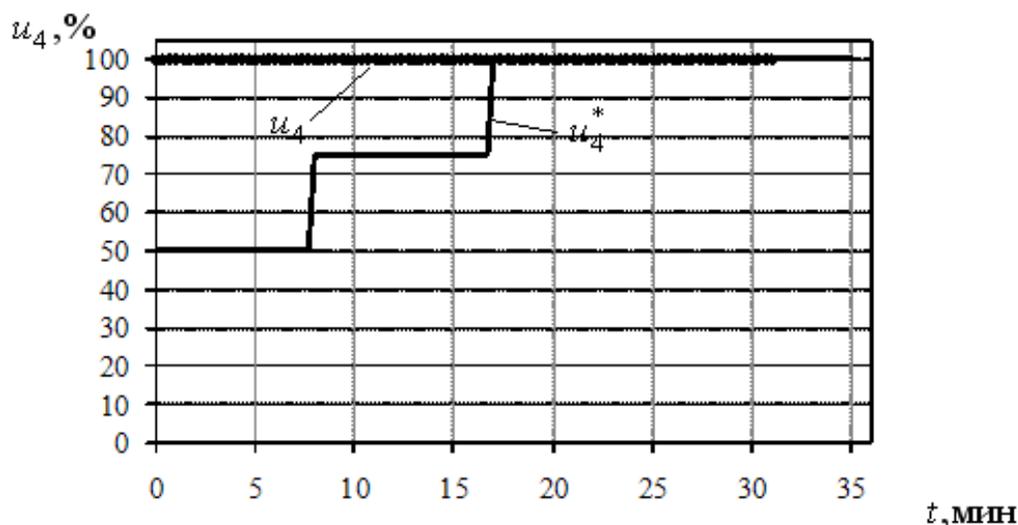


Рис. 3. Графики оптимального (u_4^*) и традиционного (u_4) управляющих воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемова С.В., Грибков А.Н. Математическая модель многосекционной сушильной установки на множестве состояний функционирования // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, №4А. – С. 969-974.
2. Артемова С.В., Муромцев Д.Ю., Грибков А.Н. Влияние интенсивности помех на минимизируемый функционал при энергосберегающем управлении с оптимальной фильтрацией // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, №3. – С. 402-409.
3. Артемова С.В., Муромцев Д.Ю., Грибков А.Н. Прогнозирование и компенсация возмущения в системах оптимального управления // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9, №4. – С. 632-637.
4. Артемова С.В., Грибков А.Н. Информационная технология анализа и синтеза энергосберегающего управления с использованием нечеткой логики // Информационные системы и процессы: Сб. науч. тр. – Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена, 2003. – С. 165-169.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.

E-mail:

Грибков А.Н. – GribkovAlexey@yandex.ru.