

УДК 638.512.011.56.001.57.681.5

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Д. Ю. Муромцев,

канд. техн. наук, доцент

Тамбовский государственный технический университет

Рассматривается комплекс задач анализа и синтеза оптимального энергосберегающего управления типовыми динамическими объектами различных классов с учетом возможных изменений состояний функционирования при эксплуатации. Для оперативного решения задач анализа и синтеза оптимального управления используется комбинация методов принципа максимума, динамического программирования и синтезирующих переменных. Приводятся алгоритмы синтеза оптимальных управляющих воздействий в реальном масштабе времени.

The set of tasks aimed at analysis and synthesis of optimum energy saving control by standard dynamic object of different types with regard for possible changes of functioning states in operation is considered. The combination of methods of maximum principle, dynamic programming and synthesizing variables is applied for operative solution of tasks of analysis and synthesis of optimum control. The algorithms of synthesis of optimum controlled effect in real time scope are given.

Во многих отраслях промышленности, в том числе машиностроительной, электротехнической, металлургической, строительных материалов, широко используются аппараты с электронагревом. Энергетические затраты на ведение технологических процессов в этих аппаратах составляют значительную долю в себестоимости продукции. С учетом роста цен на электроэнергию эти затраты становятся сопоставимыми с затратами на сырье.

Важным резервом снижения энергозатрат в тепловых аппаратах и машинах с электроприводами является оптимальное управление динамическими режимами. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что при оптимальном управлении (ОУ) отдельными аппаратами снижение затрат энергии в динамических режимах может составлять 10–25 % по сравнению с традиционным управлением. Дополнительный эффект достигается, если система управления группой аппаратов обладает интеллектуальными свойствами по использованию базы знаний и сложившейся производственной ситуации для выбора наилучшего варианта закрепления обрабатываемых деталей за определенными аппаратами.

Разрабатываемая интеллектуальная информационная система позволяет решать задачи энергосберегающего управления применительно к двум

классам сложных объектов. К первому классу относятся объекты со многими входами и многими выходами, т. е. типа МИМО-систем (Multi Input Multi Output), например, многозонные электрические печи. Главной особенностью этих объектов является то, что каждый вход влияет на несколько выходов.

Ко второму классу относятся группы объектов с сосредоточенными параметрами, например, участок термообработки с несколькими электрическими камерными печами. Здесь задаче управления динамическим режимом предшествует задача распределения термообрабатываемых изделий между отдельными печами. Этот класс объектов условно обозначим MSISO (Multi Signal Input Signal Output).

Общей особенностью рассматриваемых объектов является нелинейность модели динамики, вызываемая широким температурным диапазоном (до 1000 °С и более). Поэтому для решения задач энергосберегающего управления приходится использовать многостадийные модели в виде дифференциальных уравнений с разрывной правой частью [1, 2].

Введем следующие обозначения, отражающие особенности рассматриваемых классов объектов: m – число входов (и, соответственно, выходов) объекта МИМО, применительно к многозонной

печи m равно числу зон; k – число стадий модели с одним входом; n – число отдельных объектов в MSISO; d – число видов деталей для термообработки; l – пространственная координата в объекте с распределенными параметрами. Этим обозначениям соответствуют множества M, K, N, D и L .

С учетом рассмотренных особенностей выделим следующие виды задач оптимального управления (ЗОУ) объектами MIMO и MSISO.

1. Элементарная ЗОУ, или Э-задача, в которой $m = 1$ (или $n = 1$), $k = 1$ и $d = 1$.
2. К-задача, для которой $m = 1$ (или $n = 1$), $k \geq 2$ (и $d = 1$).
3. М-задача, для которой $m \geq 2$ и $k = 1$.
4. МК-задача с $m \geq 2$, $k \geq 2$.
5. ML и MKL – задачи для MIMO, в которых учитываются температуры и скорости их изменения по длине печи.
6. ND-задача для MSISO по выбору варианта закрепления термообрабатываемых деталей за печами.

В литературе по оптимальному управлению достаточно освещены вопросы решения Э-, К- и М-задач [3–5]. Остановимся подробнее на МК-, ML-, MKL- и ND-задачах.

МК-задача формулируется следующим образом. Объект, динамика которого описывается моделью

$$\dot{z} = A(m, k_j)z(t) + B(m, k_j)u(t), \quad j = \overline{1, m};$$

$$z = (z_1, \dots, z_m)^T; \quad u = (u_1, \dots, u_m)^T, \quad (1)$$

требуется перевести из начального состояния z^0 в конечное z^k за фиксированное время, т. е.

$$z(t_0) = z^0, \quad z(t^k) = z^k \quad (2)$$

при ограничении на управление

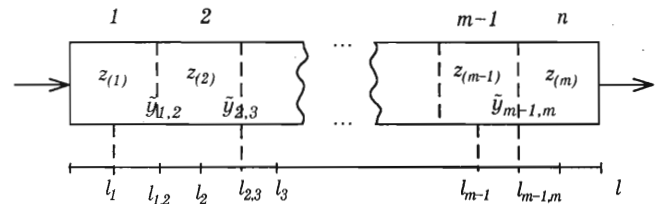
$$\forall t \in [t_0, t_k]: \quad u_i(t) \in [u_{in}, u_{ib}], \quad i = \overline{1, m} \quad (3)$$

и минимизируемом функционале

$$J = \int_{t_0}^{t_k} (z^T Q_z z(t) + u^T Q_u u(t)) dt, \quad (4)$$

где $A(m, k_j), B(m, k_j)$ – матрицы параметров блочной структуры, отражающей число стадий k_j – для каждой зоны; u_{in}, u_{ib} – границы изменения компонентов вектора управления u ; Q_z, Q_u – матрицы весовых коэффициентов.

В ML- и MKL- задачах дополнительно к фазовым координатам $z_{(1)}, \dots, z_{(m)}$, характеризующим температурные режимы в центральных частях зон, задается информация о максимальных скоростях изменения температуры y по длине l печи. Результаты имитационных экспериментов показывают, что эти изменения приходятся на точки,



■ Рис. 1. Температурные режимы по длине печи

соответствующие межзонным переходам $l_{j,j+1}$, $j = \overline{1, m-1}$ (рис. 1).

Кроме того, значения $y(l)$ в окрестности точек $l_{j,j+1}$ с достаточной точностью могут быть описаны функциональными зависимостями от значений температур в центрах соседних зон, т. е.

$$l \in [y_{j,j+1} - \Delta l, y_{j,j+1} + \Delta l]: \quad y(l) = f_j(y_j; y_{j+1}).$$

ND-задача в общем случае формулируется следующим образом. Задаются модели динамики для каждого объекта, т. е. множество моделей

$$\{\dot{z}_{(i)} = f_{ij}(z_{(i)}, u_{(i)}t; A_{ij}, B_{ij}), \quad i = \overline{1, m}\}; \quad (5)$$

а также ограничения на управление в каждый момент времени

$$\{\forall t \in T_i: \quad u_i(t) \in [u_{in}, u_{ib}], \quad i = \overline{1, m}\} \quad (6)$$

и общее (на лимит используемой энергии)

$$\sum_{i=1}^m \int_{t \in T_i} u_{(i)}(t) dt \leq J_{\Sigma}; \quad (7)$$

двумерный массив исходных данных R_{ij} , которые требуются для решения задачи управления i -м объектом при обработке деталей j -го вида:

$$R = \{R_{ij}; \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, d}\}; \quad (8)$$

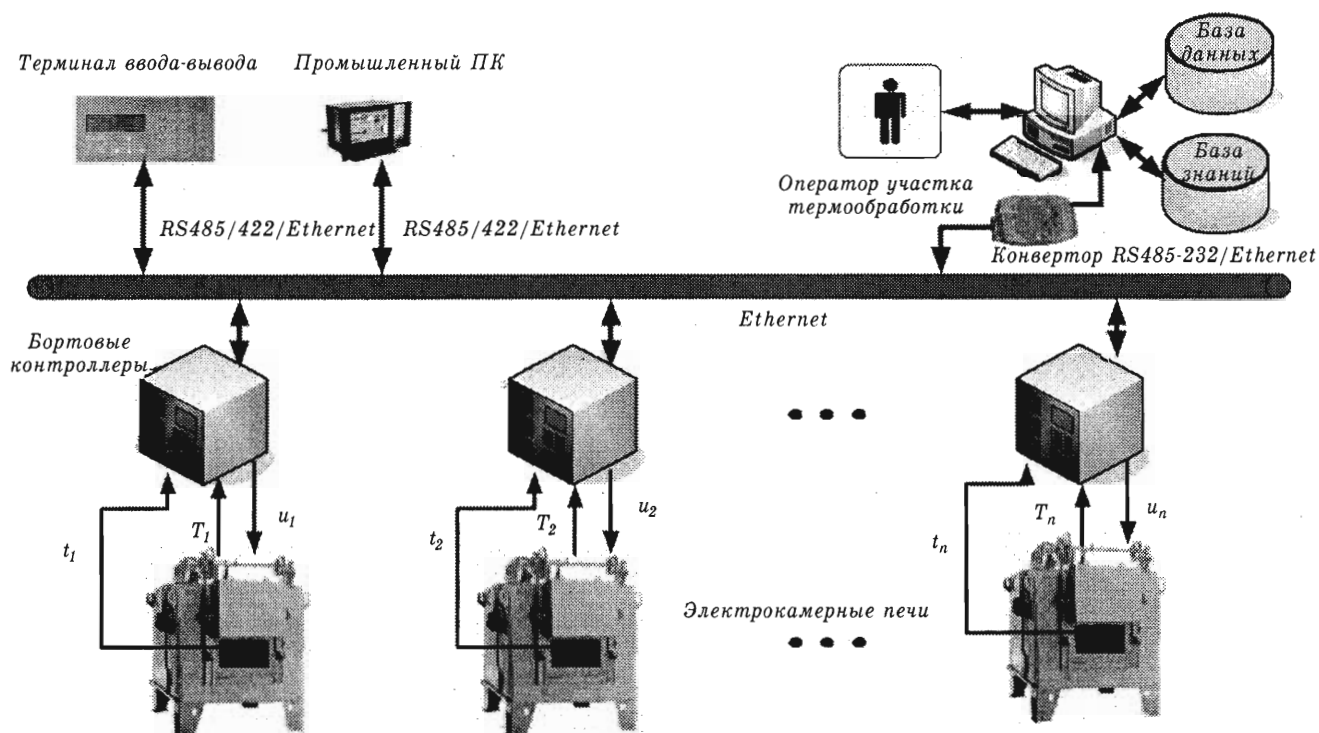
плановое задание выпуска продукции на временном интервале T

$$\Pi = \{\Pi_j, \quad j = \overline{1, d}\}; \quad (9)$$

результаты полного анализа ЗОУ для моделей динамики M_i , $i = \overline{1, m}$ (см. формулу (5)), возможных функционалов F , стратегий реализации управления S и ограничений (например, (6) и др.), т. е. четверок $K_i = \langle M, F, S, O \rangle$, $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, d}$; алгоритмы решения задачи распределения планового задания (9) между печами.

Требуется распределить плановое задание (9) между печами с учетом ограничений (6), (7). При этом общие затраты энергии должны быть минимальны:

$$J_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \int_{t \in T} (u_{(i)} u_{(i)}(t; R_{ij})(t) dt) \rightarrow \min_{u_{(i)}, R_{ij}}. \quad (10)$$



■ Рис. 2. Схема системы управления группой печей ($t_1 \dots t_n$ — температура внутри камеры печи; $T_1 \dots T_n$ — температура снаружи камеры печи; $u_1 \dots u_n$ — управляющие воздействия)

В формулах (5)–(9) $z_{(i)}, u_{(i)}$ — вектор фазовых координат и управление для i -й печи; $f_{ij}(\cdot)$ — функция, определяющая правую часть дифференциального уравнения для i -й печи при выпуске j -го изделия; A_{ij}, B_{ij} — параметры модели динамики с функцией f_{ij} ; $u_{ин}, u_{ив}$ — нижняя и верхняя границы изменения $u_{(i)}$; $J_{л}$ — выделенный лимит энергии на временной интервал T ; $T_i \subseteq T$ — временной интервал работы i -й печи; P_j — плановое задание по j -му виду продукции.

Результатом решения задачи распределения должны быть исходные данные R_{ij}^* для решения задач оптимального управления режимами работы печей. Задачи оптимального управления, т. е. Э- и К-задачи решаются бортовыми контроллерами с использованием базы знаний экспертной системы, содержащейся в промышленном компьютере [6].

Схема информационно-управляющей системы приведена на рис. 2.

Задача синтеза управления в реальном времени, решаемая бортовым контроллером, существенно облегчается, если вместо ОУ рассчитывается квазиоптимальное управление (КОУ). Проблема квазиоптимального управления связана в ряде случаев с невозможностью плавно изменять оптимальное управление по требуемому закону, а также со сложностью расчетов точного значения функции ОУ. Задачу синтеза квазиоптимального управления будем рассматривать как частный случай задачи синтеза ОУ.

В качестве основного вида КОУ $\tilde{u}(t)$ обычно рассматривается ступенчатая функция, которая с требуемой точностью или допустимым увеличением функционала аппроксимирует непрерывную функцию $u^*(t)$. Применение КОУ позволяет значительно упростить реализацию управляющих воздействий за счет небольшого числа фиксированных значений $u(t)$. Например, для электронагрева используется два нагревательных элемента, в этом случае $u(t)$ может принимать три значения: 0 (оба элемента выключены), u_1 (один элемент включен) и u_2 (два элемента включены). Число значений $\tilde{u}(t)$ может увеличиваться как за счет введения дополнительных элементов, так и за счет разных способов их включения (последовательное, параллельное, комбинированное).

Повышение точности управления при использовании КОУ достигается за счет увеличения числа «ступенек» (уровней). При этом возможны два случая. В первом случае задается m фиксированных уровней значений управляющего воздействия, т. е. $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2, \dots, \tilde{c}_m$, и требуется рассчитать моменты переключения t_1, t_2, \dots, t_{m-1} . Во втором случае фиксируются моменты переключения и определяются значения управляющих воздействий. Задаваемое число «ступенек» m зависит, с одной стороны, от возможности технической реализации, например, числа ТЭНов, с другой стороны, от требуемой точности аппроксимации ОУ.

Эффективным КОУ $\bar{u}^*(t)$ называется КОУ, которое обеспечивает увеличение функционала на некоторую достаточную величину ΔJ , % по сравнению с J^* при ОУ $u^*(t)$. Если не оговариваться особо, то берется $\Delta J = 1\%$. Обеспечение требуемой эффективности $\bar{u}^*(t)$ достигается увеличением

числа рассчитываемых параметров. Для их расчета может использоваться метод неопределенных множителей Лагранжа.

Рассмотренная информационная система внедряется на ФГУП "Тамбовский завод "Октябрь".

Литература

1. Филиппов А. Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. М.: Наука, 1985. – 224 с.
2. Муромцев Ю. Л., Орлова Л. П., Муромцев Д. Ю. Идентификация моделей, учитывающих изменение состояний функционирования // Обработка сигналов и полей. – 2000. – № 3. – С. 45–48.
3. Муромцев Ю. Л., Ляпин Л. Н., Попова О. В. Моделирование и оптимизация систем при изменении состояний функционирования. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1992. – 164 с.

4. Муромцев Д. Ю., Муромцев Ю. Л., Орлова Л. П. Синтез энергосберегающего управления многостадийными процессами комбинированным методом // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 3. – С. 169–178.
5. Муромцев Д. Ю. Оперативный синтез энергосберегающего управления для линейных систем с запаздыванием на множестве состояний функционирования // Тр. ТГТУ: Сб. науч. Ст. молодых ученых и студентов. Тамбов, 1999. – Вып. 4. – С. 47–50.
6. Муромцев Д. Ю., Орлов В. В. Информационно-технологическая среда проектирования интеллектуальных контроллеров // Компьютерная хроника. – 1997. – № 12. – С. 3–8.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья редактируется и рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи, а также фотографию и краткое изложение сведений о себе.

Процедуры согласования текста статьи, предоставления фото (размером 4×5,5 см) и сведений об авторе могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (электронный вариант фото в виде файла *.tif, *.jpg с разрешением 300 dpi).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию. При необходимости доработать статью — рецензию.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за подбор, достоверность и точность фактов, экономико-статистических и технических показателей, собственных имен и прочих сведений, а также за то, что в материалах не содержится сведений, не подлежащих открытой публикации, несут авторы публикуемых в журнале материалов и рекламодатели.