Энергосберегающее управление тепло-технологическими аппаратами

С. В. Артемова[1], А. И. Ладынин[2], Е. С. Митяков[3], Н. М. Шмелева[4]
МИРЭА – Российский технологический университет
[1]sartemova@mail.ru, [2]andrey.ladynin@hotmail.com,
[3]iyao@mail.ru, [4]nina.sh.02@mail.ru

М. А. Каменская
Тамбовский государственный университет
art_mari@bk.ru

***Аннотация*. Рассматривается создание системы энергосберегающего управления динамическими режимами, инвариантной различным тепло-технологическим аппаратам. Приводятся классы тепло-технологических аппаратов и области их применения. Выделяются основные особенности управления подобными классами объектов. Формулируется задача энергосберегающего управления с фиксированными интервалами на время и управляющее воздействие. Приводятся примеры решения задач энергосберегающего управления для двух классов тепло-технологических аппаратов: сушильная установка вальце-ленточного типа и печи отжига магнитопроводов. Для сушильной установки вальце-ленточного типа минимизируется функционал затраты топлива, а для печи отжига магнитопроводов функционал затраты энергии. При решении задачи минимизации затрат топлива учитывается влияние соседних зон друг на друга, а решение задачи минимизации затрат энергии учитывает различные состояния функционирования тепло-технологического аппарата. Внедрение системы энергосберегающего управления в промышленности позволяют экономить от 5 % до 15 % энергии в динамических режимах работы тепло-технологических аппаратов.**

Ключевые слова: минимизируемый функционал, тепло-технологический аппарат, энергосберегающее управление, множество состояний функционирования

I. Введение

Одним из приоритетов научно-технического прогресса на современном этапе во всем мире стала проблема энергопотребления. Экономия топливно-энергетических ресурсов может быть достигнута либо повышением КПД энергоустановки, либо за счет применения программ энергосбережения.

Наиболее важное изменение приоритета и содержания задач управления затратами в современной сложной экономической ситуации заключается в том, что для предприятий на первый план выходит задача обеспечения конкурентоспособности, в том числе за счет энергосбережения. В целях повышения эффективности и конкурентоспособности в энергоемких отраслях промышленности в рамках модернизации производственных процессов на современном этапе развития промышленного производства прибегают к внедрению энергосберегающих управляющих систем [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-08-00091 А

К наиболее энергоемким объектам управления в металлургии, машиностроении, пищевой, легкой, химической, лесоперерабатывающей, строительной промышленности, а также сельском, жилищно-коммунальном хозяйстве, авто- и авиастроении относятся тепло-технологические аппараты (ТТА), представляющие собой одно- или многозонные устройства, в пределах которых осуществляются все стадии тепло-технологического процесса. Среди ТТА можно выделить четыре класса энергоемких объектов это: печи, сушильные, холодильные и котельные установки.

Основными особенностями ТТА, как объектов управления, являются большие затраты энергетических и топливных ресурсов; высокие требования к поддержанию температурных режимов; наличие в аппаратах нескольких тепловых зон влияющих друг на друга; различная природа действующих в каналах управления и измерения дестабилизирующих факторов (ДФ); наличие таких изменений технологических режимов, для которых невозможен пересчет их параметров в реальном времени; использование различных критериев, характеризующих ведение технологических процессов с точки зрения энергосбережения и качества производимой продукции; вектор управления может содержать два типа компонентов (действующих на аппарат в целом и отдельно по его тепловым зонам) [2].

Авторами разработана к внедрению (и внедрена на некоторых предприятиях) в рамках модернизации автоматизированных производственных процессов во многих отраслях промышленности энергосберегающая управляющая система (ЭУС) инвариантная различным ТТА, позволяющая оперативно вырабатывать управляющие воздействия, минимизирующие энергопотребление в динамических режимах.

II. Постановка задачи энергосберегающего управления

Задачу энергосберегающего управления можно задать в общем виде. Обозначим через A, B – матрицы параметров модели; t_0, t_k– начальное и конечное значения временного интервала управления; z^0, z^k– начальное и конечное значения вектора управления; $u_н, u_в$– нижнюю и верхнюю границы изменения управляющего воздействия; n– размерность вектора z.

Пусть задана динамическая модель объекта в виде системы линейных дифференциальных уравнений

$$\overset{\circ}{z} = Az(t) + Bu(t), \quad t \in [t_0, t_к], \tag{1}$$

при этом условия на вектор фазовых координат z и скалярное управление u имеют вид:

$$z(t_0) = z^0 = \left(z_1^0, z_2^0, ..., z_n^0\right)^т, \quad z(t_к) = z^к = \left(z_1^к, z_2^к, ..., z_n^к\right)^т \tag{2}$$

$$\forall t \in [t_0, t_к]: \ u(t) \in [u_н, u_в] \ . \tag{3}$$

Требуется минимизировать функционал

$$I = \int_{t_0}^{t_к} f_0\left(u(t)\right) dt \ . \tag{4}$$

Также необходимо для заданного массива исходных данных

$$R = \left(A,\ B,\ u_н,\ u_в,\ z^0,\ z^к,\ t_0,\ t_к\right) \tag{5}$$

найти такое управление $u^*(t)$, при котором для условий (1)–(3) функционал (4) достигает минимума.

Для выше сформулированной задачи функция $f_0(u(t))$ задает вид функционала затрат, при минимизации энергопотребления она имеет вид u^2 в случае затрат электроэнергии или $|u|$ в случае затрат перегретого пара. Описанная задача (1)–(4) является задачей оптимального управления с условием на управляющее воздействие, заданным интервалом времени и закрепленными концами траектории вектора фазовых координат. Обычно за первую компоненту вектора управления z для тепловых объектов принимают среднюю температуру исследуемого тела, за вторую координату принимают скорость изменения температуры и т. д. При электро-нагреве и для машин с электроприводом за управление u принимают напряжение или силу тока в сети. Иногда в качестве управления выбирают расход топлива или теплоносителя.

III. Решение задачи энергосберегающего управления

Пример энергосберегающего управления приведем для двух видов энергоемких ТТА с различным видом энергии. В первом случае рассмотрим динамику разогрева многосекционной вальце ленточной сушильной установки, в которой теплоносителем является перегретый пар. Во втором – динамику разогрева электронагревательной технологической установки отжига магнитопроводов (ТОМ-1).

Первый пример. Сушильная установка (СВЛ) содержит пять секций, вальцевую систему, пластинчатый и скребковый конвейеры, паровые калориферы, ворошитель и рециркуляционные вентиляторы, где брикеты обрабатываемого материала высушиваются на пластинчатом конвейере при непрерывном отводе отработанного сушильного агента. Процесс сушки характеризуется значительными энергетическими затратами – 37–45 ГДж/т сухого продукта, невысокой производительностью 30–50 кг сухого продукта/ч, отводом сушильного агента с низкой влажностью при высокой температуре 60–75°С.

Необходимо разогреть секции сушильной установки без загрузки пастообразного материала до их рабочей температуры. Здесь в качестве объектов управления рассматриваются паровые калориферы секций. Сформулированную выше задачу управления процессом нагрева (1)–(4) можно представить в виде отдельных задач для каждой секции сушильной установки. При этом минимизируется функционал расход перегретого пара

$$I = \int_{t_0}^{t_к} \left|u_i(t)\right| dt \to \min \ .$$

Калориферы, установленные в секциях сушильной установки, отличаются своими техническими характеристиками и, следовательно, изменяются виды и параметры моделей динамики разогрева m_i для каждой секции. Для определения видов моделей динамики разогрева секций, числа зон моделей и оценки их параметров был поставлен эксперимент, в результате которого получены термограммы разогрева пяти секций СВЛ (рис. 2).

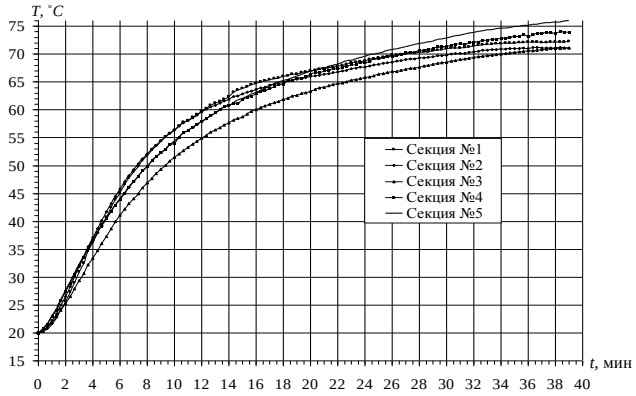

Рис. 1. Термограммы нагрева секций сушильной установки

Модели динамики разогрева секций сушильной установки получены с учетом основного критерия выбора наилучшей структуры – минимума максимального значения абсолютной погрешности Δz модели. 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. В общем виде динамика процесса нагрева СВЛ описывается множеством моделей для отдельных камер:

$$\mathsf{M}_{h^{\mathrm{p}}} = \{\mu_1, \mu_2, ..., \mu_k\},$$

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

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

здесь j соответствует номеру зоны модели, i обозначает номер камеры $(j = 1, \dots, \pi; i = 1, \dots, n)$, $A_i^j, B_i^j, C_i^j, D_i^j$ – 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:

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

В результате решения задачи энергосберегающего управления определяются оптимальные управляющие программы $u_i^*(\cdot) = (u_i^*(t), t \in [t_i^0, t_i^k])$ и траектория изменения фазовых координат $z_i^*(\cdot) = (z_i^*(t), t \in \left[\frac{t_i^0 t_i^k}{u_i^*(t)}\right]$, соответствующие, каждой секции сушильной установки.

Графики управляющих воздействий приведены на рис. 3. На рис. 4 изображены траектории изменения первой фазовой координаты при оптимальном и традиционном управлении.

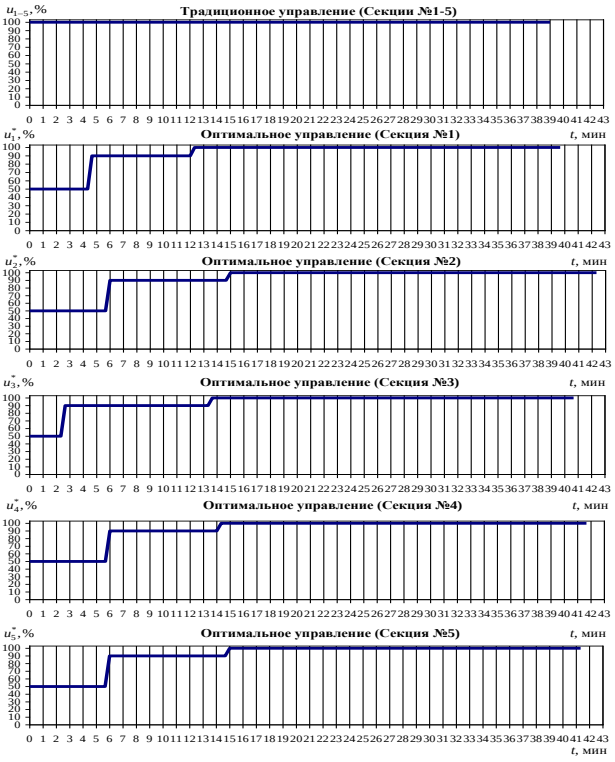

Рис. 2. Графики управляющих воздействий для пяти секционной сушильной установки

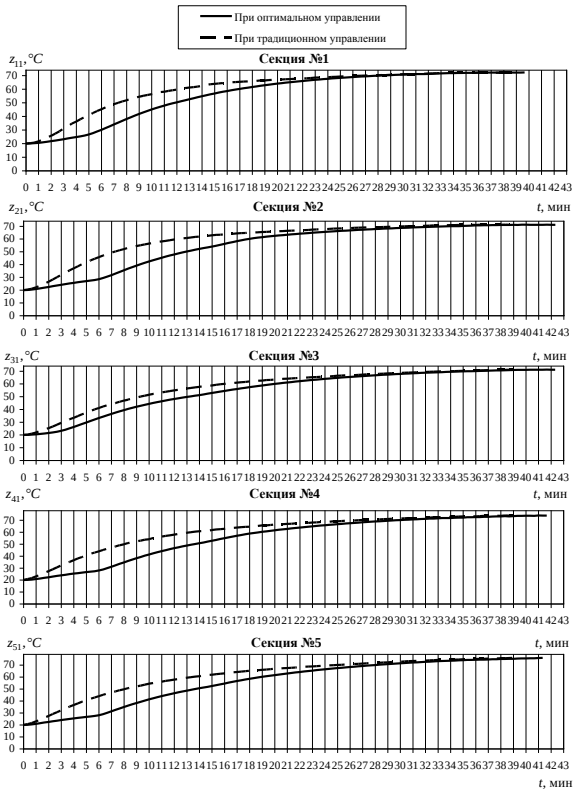

Рис. 3. Графики управляющих воздействий для пяти секционной сушильной установки

Графики траекторий изменения фазовых координат для пяти секционной сушильной установки при энергосберегающем и традиционном управлении

В качестве второго примера, рассмотрим технологическую установку термообработки магнитопроводов (ТОМ-1), представляющую собой проходную печь сопротивления. В печи обрабатываются заготовки магнитопроводов различных типоразмеров. Для каждых типа и размера сердечника магнитопровода в печи установлен лоток, соответствующего размера, при этом изменяются показатели режима отжига: температура в печи, продолжительность цикла, давление.

При рассмотрении задачи управления минимизируется функционал вида

$$I = \int_{t_0}^{t_к} u^2 dt \to \min .$$

С учетом множества состояний функционирования можно выделить два основных случая: разогрев остывшей печи и ее догрев, к последнему случаю относятся и смены температурных режимов [3, 4].

В каждом из этих состояний используется своя модель динамики процесса нагрева. Общая модель записывается следующим образом

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ --- \\ \dot{z} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & a_{h_1} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b_{h_1} \end{pmatrix} u(t), z \in [18;355); \\ \\ ---------- \\ a_{h_2} z(t) + b_{h_2} u(t), z \in [355;550); \\ a_{h_3} z(t) + b_{h_3} u(t), z \in [550;850]. \end{cases}$$

Здесь первая зона описывается двойным интегратором с погрешностью $\Delta h_1 = 2\ ^0$C, а вторая и третья зоны – апериодические звенья с различными параметрами a и b и массивами реквизитов максимальные погрешности которых $\Delta h_2 = 1{,}3\ ^0$C и $\Delta h_3 = 0{,}8\ ^0$C соответственно.

Оптимальное управление ищется в виде программы. Расчет оптимальной программы связан с определением видов функций и расчетом параметров функции управления для каждой стадии модели отдельно и решением задачи их временной стыковки.

В результате решения получена программа энергосберегающего управления, имеющая вид:

$$\tilde{u}^*(\bullet) = \begin{cases} \tilde{u}_1^*(t) = 122{,}04 - 7{,}96t, & t \in [0;13{,}1), \\ \tilde{u}_2^*(t) = \begin{cases} 175 + 150{,}2e^{0.1306(t-13{,}1)}, & t \in [13{,}1;14{,}3), \\ 350, & t \in [14{,}3;19), \end{cases} \\ \tilde{u}_3^*(t) = \begin{cases} 175 + 139{,}6e^{0{,}014(t-19)}, & t \in [19;35{,}1), \\ 350, & t \in [35{,}1;52]; \end{cases} \end{cases}$$

Полученная программа снижает энергозатраты на 13 % по сравнению с традиционным нагревом при u=const.

IV. Заключение

В заключении подводится итог исследования.

В работе получены аналитические модели динамического режима нагрева секций сушильной установки, а также получены программы энергосберегающего управления, снижающие затраты на 5–10 %. Предложенные аналитические модели динамики переменной структуры для разогрева и догрева технологической установки ТОМ-1 с абсолютной погрешностью, не превышающей 20 ºС. Решены задачи оптимального управления и синтезированы управляющие воздействия. Приведенные программы управления позволяют снизить энергозатраты на 5–15 %. Применение энергосберегающего управления наряду с экономичным использованием энергии позволяет продлить срок службы карбид-кремниевых нагревателей, т. к. программы энергосберегающего оптимального управления дают возможность плавно повышать напряжение питания.

Список литературы

[1] Тарасов И.Е., Потехин Д.С. Синтез сверточных функций в реальном времени в системах программно-зависимого радио и фазо-частотных измерительных устройствах // Российский технологический журнал. 2018;6(6):41-54. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-41-54

[2] Andreev S.M., Parsunkin B.N. and Savinov A.S. Evaluation of Constraints Influence on Optimal Control of Billet Heating Before Rolling // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728890.

[3] Rokachevskii O.A., Sleptsov V.V., Ablaeva A.E., Kanaev S.A. and Moskalenko O.V. Metrological assurance of the characteristics of electric drives at the design stage // Journal of Physics: Conference Series, 1889 (2021) 042057, ICMSIT-II 2021, p.3-6. IOP Publishing, doi:10.1088/1742-6596/1889/4/04205

[4] Artemova S.V., Ladynin A.I., Kalenyuk I.V., Shmeleva N.M. and Kamenskaia M.M. Energy-saving Information and Control System for Electric Magnetic Core Annealing Furnaces // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021, pp. 786-789, doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396129.