

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ И ДАВЛЕНИЕМ В КАМЕРНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Запорожская государственная инженерная академия

Визначено спосіб управління та структуру системи автоматичної оптимізації за вартістю опалення, який забезпечує автономне управління температурою й тиском газів, що гріють, у робочих камерах полум'яних термічних печей.

Определены способ управления и структура системы автоматической оптимизации по стоимости отопления, обеспечивающие автономное управление температурой и давлением греющих газов в рабочих камерах пламенных термических печей.

Введение. Текущее состояние тепловой работы термических печей как объектов управления определяется величинами температуры и избыточного давления греющих газов в рабочих камерах. Требуемые значения этих величин обеспечиваются локальными системами автоматического регулирования температуры и давления соответственно. Структура и настройки этих систем, как правило, выбираются независимо друг от друга. При этом не учитывается взаимосвязь систем, которая особенно проявляется при изменении тепловой мощности печей в широких диапазонах, характерных для пламенных термических печей. Так, при управлении расходами топлива и воздуха изменяется не только температура, но и давление в печи, что, в свою очередь, приводит к изменению газообмена с окружающей средой (подсосу холодного воздуха или выбиванию дымовых газов), влияющего на температуру в печи. Все это, в конечном счете, вызывает перерасход топлива и повышает стоимость термической обработки изделий.

Сегодня актуальной задачей является снижение стоимости термической обработки путем сокращения потребления топливных энергоресурсов, в частности, природного газа, а также повышения качества управления тепловой работой печей.

Постановка задачи. Задачей настоящих исследований является определение способа управления и структуры системы автоматической оптимизации по стоимости отопления термических камерных печей, обеспечивающих автономное регулирование температуры и давления греющих газов в рабочих камерах.

Основная часть. Управление температурой и давлением в рабочих камерах печей осуществляют непрерывно в течение 20...40 ч, технологически необходимых для протекания процессов термообработки. Известно, что оптимизацию подобного управления целесообразно осуществлять на многошаговой дискретной модели, получаемой путем квантования по времени и выбора из класса допустимых оптимальных управлений на каждом шаге. Период квантования по времени Δt выбирают таким образом, чтобы изменение температуры и давления как регулируемых величин, а также расходов газа и воздуха как регулирующих воздействий, можно было оценивать с технологически допустимой точностью по их среднему значению за период. Для камерных печей в зависимости от их производительности и мощности время квантования Δt равно 5...20 мин.

Исходя из условия управляемости решение задачи оптимизации регулирования двух параметров – температуры и давления, возможны при получении нескольких, не менее двух, управляющих воздействий. В связи с этим, рассматривали технологию отопления

печей с отдельной подачей нескольких топливных газов и комбинацией их непосредственно в процессе сжигания.

Используя принцип динамического программирования Беллмана [1] для оптимизации управления за весь цикл термообработки, необходимо за каждый период квантования по времени выбрать оптимальную по стоимости комбинацию топливных составляющих:

$$S_0[m] = \min \left\{ \Delta\tau \cdot \sum_{k=1}^i \ddot{O}_k \cdot \bar{B}_{\dot{o}_k}[m] + S_0[m-1] \right\}, \quad (1)$$

где $S_0[m]$ – общая стоимость отопления за m периодов квантования; $\Delta\tau$ – время квантования; m – номер периода квантования; i – число газовых составляющих, используемых при комбинации состава топлива; \ddot{O}_k – стоимость k -ой топливной составляющей; $\bar{B}_{\dot{o}_k}[m]$ – среднее значение расхода k -ой составляющей топлива за m -й период квантования; $S_0[m-1]$ – общая стоимость отопления за $[m-1]$ период квантования.

Исходя из того, что текущая стоимость F_u топлива является линейной функцией средних за период расходов топливных компонентов $\bar{B}_{\dot{o}_k}$ нахождение минимального значения стоимости F_u для каждого дискретного момента времени представлено как решение задачи линейного программирования.

Так, при отоплении печи смесью различных газов текущую стоимость топлива за период квантования определяют как:

$$F_{\dot{o}}[m] = \tilde{N}_1 \cdot B_{\dot{o}_1}[m] + \tilde{N}_2 \cdot B_{\dot{o}_2}[m] + \dots + \tilde{N}_n \cdot B_{\dot{o}_n}[m], \quad (2)$$

где $F_{\dot{o}}[m]$ – текущая стоимость отопления; $B_{\dot{o}_1}[m], B_{\dot{o}_2}[m], \dots, B_{\dot{o}_n}[m]$ – средние расходы топливных газов, подаваемых в горелки, C_1, C_2, \dots, C_n – рыночная стоимость соответствующих газов.

В общем случае уравнения-ограничения могут быть записаны в виде:

$$\left| \sum_{k=1}^i [Q_i^{\dot{o}}]_k \cdot B_{T_k}[m] + a_{\dot{a}} \cdot L_{\dot{a}}[m] = \bar{q}^i[m]; \right. \quad (3)$$

$$\left| \sum_{k=1}^i V_{0k} \cdot B_{T_k}[m] + L_{\dot{a}}[m] = \bar{V}^p[m]; \right. \quad (4)$$

$$\left| \sum_{k=1}^i B_{T_k}[m] \leq B_T^{\max}; \right. \quad (5)$$

$$\left| \sum_{k=1}^i L_{0k} \cdot B_{T_k}[m] + L_{\dot{a}} \leq L_{\dot{a}}^{\max}, \right. \quad (6)$$

где $[Q_i^{\dot{o}}]_k$ – теплота сгорания k -го топливного газа; V_{0i} – удельный объем продуктов сгорания, получаемых при сжигании k -го топливного газа; $a_{\dot{a}}$ – удельная энтальпия воздуха; $L_{\dot{a}}[m]$ – расход избыточного (сверх стехиометрического) воздуха; B_T^{\max} – максимальная производительность топливосжигающих устройств; $L_{\dot{a}}^{\max}$ – максимальная

производительность вентилятора; $\bar{q}^i[m]$ – тепловая нагрузка, устанавливаемая регулятором температуры в печи \bar{t} ; $V^{\bar{p}}[m]$ – расход продуктов сгорания, определяемый регулятором давления в печи.

В такой постановке задача имеет смысл в том случае, если система уравнений (3)-(6) совместна, то есть согласно теореме Кронекера-Конелли ранг z основной матрицы и расширенной матрицы системы совпадают. Для данного случая $z \leq n + 1$. Решение подобных задач обычно осуществляют симплекс-методом.

В термических печах, как правило, используется смешанный газ на основе двух видов топливных газов, сжигаемый с коэффициентом расхода воздуха α , нередко превышающем значение 1,2...1,5 в период выдержки. Установлено, что условие совместности уравнений выполняется для топливных газов с существенно различной теплотой сгорания и имеющих различную химическую природу горючих компонентов. Например, при использовании доменного газа – основной горючий компонент монооксид углерода CO , природного газа – метан CH_4 , коксового газа – водород H_2 [2,3].

В связи с этим рассмотрена задача комбинирования двух видов топливных га-зов – высококалорийного, низкокалорийного и избыточного воздуха $L_{\hat{a}}$.

Система уравнений-ограничений принимает вид:

$$[Q_i^{\delta}]^{\hat{a}\hat{e}} \cdot \hat{A}_{\hat{O}}^{\hat{a}\hat{e}}[m] + [Q_i^{\delta}]^{i\hat{e}} \cdot \hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m] + a_{\hat{a}} \cdot L_{\hat{a}}[m] = \bar{q}^i[m], \quad (7)$$

$$V_0^{\hat{a}\hat{e}} \cdot \hat{A}_T^{\hat{a}\hat{e}}[m] + V_0^{i\hat{e}} \cdot \hat{A}_T^{i\hat{e}}[m] + L_{\hat{a}}[m] = V^{\bar{0}}[m]. \quad (8)$$

Минимизируемая функция стоимости без учета стоимости вентиляторного воз-духа представлена в виде:

$$S[m] = \Delta\tau \cdot C_{\hat{a}\hat{e}} \cdot \hat{A}_{\hat{O}}^{\hat{a}\hat{e}}[m] + \Delta\tau \cdot C_{i\hat{e}} \cdot \hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m] = \min, \quad (9)$$

где $\hat{A}_{\hat{O}}^{\hat{a}\hat{e}}[m]$, $\hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m]$ – соответственно расход высококалорийного и низкокало-рийного топлива в m -й период времени; $[Q_i^{\delta}]^{\hat{a}\hat{e}}$, $[Q_i^{\delta}]^{i\hat{e}}$ – соответственно теплота сгорания высококалорийного и низкокалорийного топлива; $C_{\hat{a}\hat{e}}$, $C_{i\hat{e}}$ – соответст-венно стоимость высококалорийного и низкокалорийного топлива.

Анализ базисных решений показывает, что при $q^i(m) \geq [Q_i^{\delta}]^{i\hat{e}} \cdot \hat{A}_{\hat{O}_{\max}}^{i\hat{e}}[m]$, оптимальное решение будет для $L_{\hat{a}} = 0$, где $\hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m]$ – максимально возможный расход низкокалорийного топлива, удовлетворяющий условию (5).

Тепловую нагрузку печи форсируют за счет замещения низкокалорийного топ-лива $\hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m]$ эквивалентным по объему продуктов сгорания высококалорийным топ-ливом $\hat{A}_{\hat{O}}^{\hat{a}\hat{e}}[m]$.

Расходы $\hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m]$ и $\hat{A}_{\hat{O}}^{\hat{a}\hat{e}}[m]$ рассчитывают согласно выражениям:

$$\hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m] = \frac{[Q_i^{\delta}]^{\hat{a}\hat{e}} \cdot V_0[m] - \bar{q}^i[m] \cdot V_0^{\hat{a}\hat{e}}[m]}{[Q_i^{\delta}]^{\hat{a}\hat{e}} \cdot V_0^{i\hat{e}}[m] - [Q_i^{\delta}]^{i\hat{e}} \cdot V_0^{\hat{a}\hat{e}}}, \quad (10)$$

$$\hat{A}_{\hat{O}}^{\hat{a}\hat{e}}[m] = \frac{q^{\bar{i}}[m] \cdot V_0^{i\hat{e}}[m] - [Q_i^{\delta}]^{i\hat{e}} \cdot V_0[m]}{[Q_i^{\delta}]^{\hat{a}\hat{e}} \cdot V_0^{i\hat{e}}[m] - [Q_i^{\delta}]^{i\hat{e}} \cdot V_0^{\hat{a}\hat{e}}[m]} \quad (11)$$

При избытке теплоты тепловую мощность снижают за счет разбавления низкокалорийного топлива $\hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m]$ эквивалентным по объему продуктов сгорания расходом избыточного воздуха $L_{\hat{a}}[m]$, то есть расходом воздуха свыше необходимого для горения.

Расходы $\hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m]$ и $L_{\hat{a}}[m]$ рассчитывают по формулам:

$$\hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m] = \frac{q^{\bar{i}}[m] - V_0[m] \cdot a_{\hat{a}}}{[Q_i^{\delta}]^{i\hat{e}} - V_0^{i\hat{e}} \cdot a_{\hat{a}}}, \quad (12)$$

$$L_{\hat{a}}[m] = \frac{[Q_i^{\delta}]^{i\hat{e}} \cdot V_0[m] - q^{\bar{i}}[m] \cdot V_0^{i\hat{e}}[m]}{[Q_i^{\delta}]^{i\hat{e}} - V_0^{i\hat{e}} \cdot a_{\hat{a}}}. \quad (13)$$

В отличие от симплекс-метода, предполагающего переход от одного допустимого базисного решения к другому по результатам анализа изменения минимизируемой функции (9), в данном случае возможно упрощение процедуры поиска оптимальных значений расходов $\hat{A}_{\hat{O}}^{i\hat{e}}[m]$, $\hat{A}_{\hat{O}}^{\hat{a}\hat{e}}[m]$, $L_{\hat{a}}[m]$, выполняя только сравнение значения текущей величины $q^{\bar{i}}[m]$ с максимальным значением $\hat{A}_{\hat{O}_{\max}}^{i\hat{e}} \cdot [Q_i^{\delta}]^{i\hat{e}}$. Данный алгоритм легко реализуется системой оптимизации с ограниченными вычислительными возможностями.

На рис. 1 представлена укрупненная блок-схема расчета оптимальных величин расходов. В приведенной схеме показана только дискретная часть цифрового оптимизатора. Рассчитанные величины расходов использованы как управляющие сигналы (задания) для соответствующих систем автоматического регулирования.

От регуляторов температуры и давления

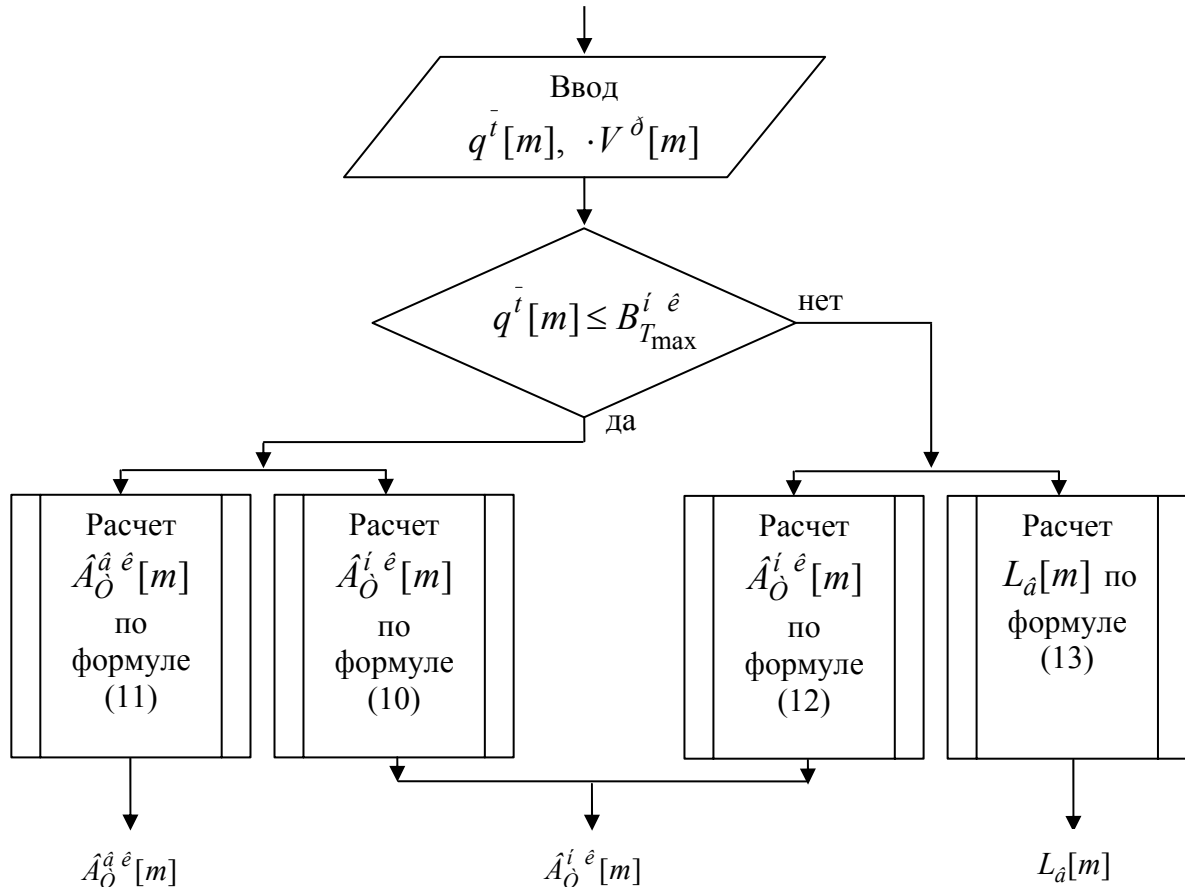


Рисунок 1 – Блок-схема расчета расходов $\hat{A}_O^{i, ê} [m]$, $\hat{A}_O^{\hat{a}, ê} [m]$ и $L_{\hat{a}} [m]$

Ни рис. 2 приведена укрупненная функциональная схема системы автоматической оптимизации регулирования температуры и давления в печи.

В схеме приняты обозначения: $D_i^{\zeta\hat{a}\hat{a}}(\tau)$, $t_i^{\zeta\hat{a}\hat{a}}(\tau)$, $D_i(\tau)$, $t_i(\tau)$ – соответственно заданные согласно технологическим инструкциям термообработки и текущие значения избыточного давления в печи и температуры в печи как функции времени τ . $\hat{A}_O^{\hat{a}, ê}(\tau)_{\zeta\hat{a}\hat{a}}$, $\hat{A}_O^{\hat{a}, ê}(\tau)$, $\hat{A}_O^{i, ê}(\tau)_{\zeta\hat{a}\hat{a}}$, $\hat{A}_O^{i, ê}(\tau)$, $L_{\hat{a}}(\tau)_{\zeta\hat{a}\hat{a}}$ и $L_{\hat{a}}(\tau)$ – соответственно заданные и текущие значения расходов топливных газов и избыточного воздуха, подаваемых в топливосжигающие устройства.

Использование одних и тех же воздействий $\hat{A}_O^{\hat{a}, ê}(\tau)$, $\hat{A}_O^{i, ê}(\tau)$, $L_{\hat{a}}(\tau)$ для управления температурой и давлением в печи, определяемых из системы уравнений (6) и (7), предопределяет независимость $t_i(\tau)$ и $D_i(\tau)$ друг от друга, тем самым обеспечивая автономность управления при изменении $t_i^{\zeta\hat{a}\hat{a}}(\tau)$ и $D_i^{\zeta\hat{a}\hat{a}}(\tau)$. В процессе управления в режиме реального времени с оптимизацией по стоимости происходит самонастройка системы.

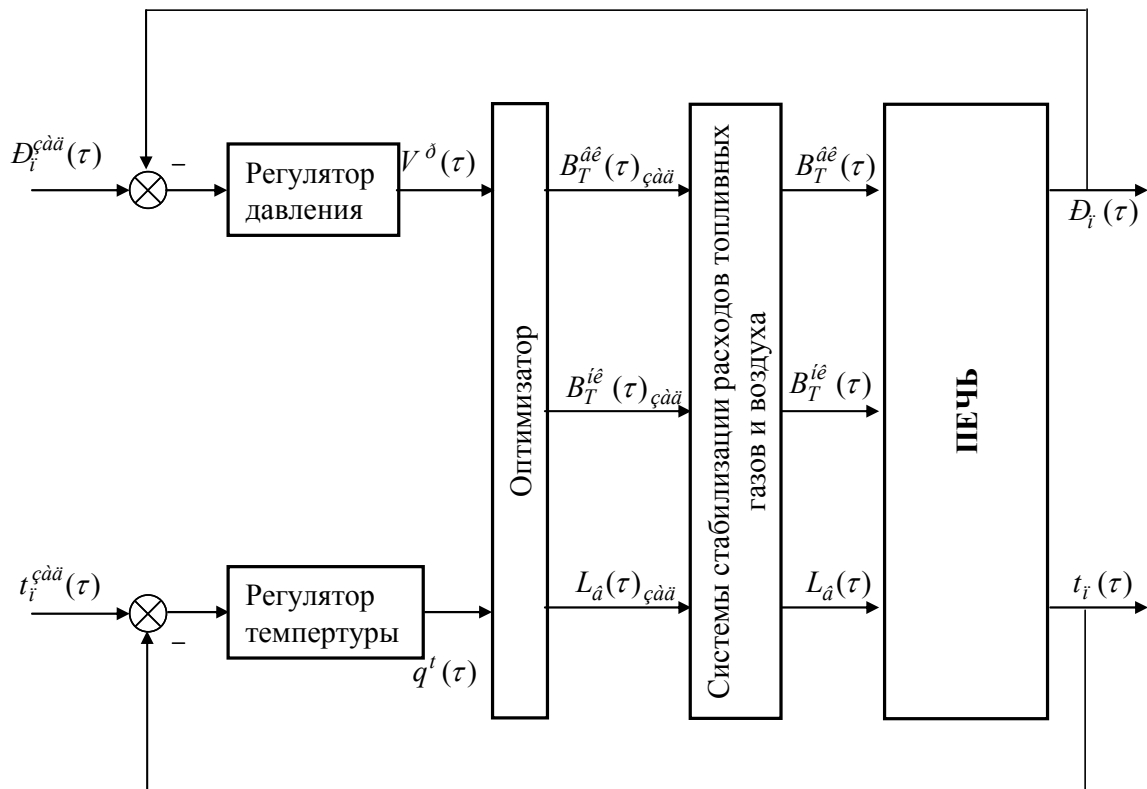


Рисунок 2 – Функціональна схема системи оптимізації

Заключення. Розроблена автоматична система дозволить не тільки оптимізувати технологію опалення по вартості паливних газів, але й шляхом самонастроїки забезпечить автономність управління величинами, характеризуючими теплову роботу печей, що дозволить підвищити якість термообробки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузин Л. Т. Основы кибернетики / Л. Т. Кузин. – М.: Энергия, 1973. – 504 с.
2. Пат. 16114 Україна, МПК, F 23 C 99/00 (2006). Спосіб опалення камерних газових печей // Ревун М. П., Зінченко В. Ю., Лютий О. П. [та ін.]; заявник і патентоволодарь. – Запоріж. держ. інж. академія. № 200602088; заявл. 27.02.2006; видано 17.07.2006; опубл. 17.07.2006.
3. Зінченко В. Ю. Стабілізація газодинамічного режиму камерних печей шляхом комбінування складових сумішного газу / В. Ю. Зінченко, М. П. Ревун // Металургія: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2007. – Вип. 16. – С. 114-120.

Стаття надійшла до редакції 14.12.2010 р.
Рецензент, проф. І.Г. Яковлева