

**ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ  
«ГАЗОГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ  
ЗОНА» КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
И УРАВНЕНИЕ ОБЩЕЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ  
НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ (ТЕРМИЧЕСКОЙ) ПЕЧИ**

Докт. тех. наук, проф. **НЕСЕНЧУК А. П.**,  
кандидаты техн. наук **МАНДЕЛЬ Н. Л.**, **РЫЖОВА Т. В.**,  
канд. техн. наук, доц. **ПШОНИК М. Г.**,  
инженеры **ШКЛОВЧИК Д. И.**, **АЙДАРОВА З. Б.**

*Белорусский национальный технический университет,  
РУП «Минский автомобильный завод»*

При разработке работоспособной схемы автоматического (ручного) регулирования высокотемпературного объекта анализ устойчивости регулирования тепловой нагрузки многозонного объекта «газогорелочное устройство – технологическая зона» имеет исключительно важное значение.

Ниже запишем возможный вариант уравнения динамики регулирования многозонного объекта. При этом принимаем допущения: изменение температуры в смежных с основной зонах происходит по тем же законам, что и в основной. Кроме того, при записывании уравнения динамики рассматривается приведенная теплоемкость зоны (объекта регулирования) без разделения на теплоемкости ее отдельных элементов (садка, футеровка и т. п.). Также не учитывается изменение приведенной теплоемкости с изменением температуры в зоне высокотемпературной установки (печи). И, наконец, давление продуктов сгорания в зоне считается постоянным.

Для зоны регулирования запишем уравнение баланса теплоты

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{пр}} + \Sigma Q_i, \quad (1)$$

где  $Q_{\Sigma}$  – теплота, вносимая в зону;  $Q_{\text{пр}}$  – приведенная теплоемкость зоны (в данном случае это теплота (в основном), расходуемая на нагрев садки;  $\Sigma Q_i$  – тепловые потери объектом регулирования (за исключением  $Q_1$ ).

Также можно записать:

$$G_{\text{пр}} c_{\text{р.пр}} = \frac{dt}{d\tau}; \quad G_{\text{пр}} c_{\text{р.пр}} = Q_{\text{пр}}; \quad Q_{\Sigma} = \frac{dt}{d\tau} + \Sigma Q_i. \quad (2)$$

Или, используя (1), запишем:

$$\Delta Q_{\Sigma} = \Delta G_{\text{пр}} c_{\text{р.пр}} \frac{dt}{d\tau} + \Delta \Sigma Q_i; \quad (3)$$

$$G_{\text{пр}} c_{\text{р.пр}} \frac{dt}{d\tau} = \Delta Q_{\Sigma} - \Delta \Sigma Q_i. \quad (4)$$

Уравнение (4) в дальнейшем можно рассматривать как уравнение динамики регулирования зоны печи (объекта регулирования), где количество теплоты, вносимое в зону, представляется выражением

$$\Delta Q_{\Sigma} = \Delta B Q_{\text{H}}^{\text{p}}, \quad (5)$$

где

$$B = km \sqrt{\frac{p_{\text{к}} - p_{\text{п}}}{\rho}}.$$

Здесь  $k$  – коэффициент расхода топлива;  $m$  – степень открытия регулирующего органа;  $p_{\text{к}}$  – давление в топливном коллекторе перед газогорелочным устройством;  $p_{\text{п}}$  – давление продуктов сгорания топлива в печи.

Составляющая  $\Delta \Sigma Q_i$ , входящая в (4), может быть представлена

$$\Delta \Sigma Q_i = \Delta Q_{\text{о.к}} + \Delta Q_{\text{изл}} + \Delta Q_{\text{охл}} + \Delta Q_{\text{г.ух}}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} Q_{\text{о.к}} &= f(t_{\text{кл}}, t_{\text{о.с}}, R_{\lambda}, R_{\alpha}, F_{\text{кл}}); \\ Q_{\text{изл}} &= f_1(\sigma_0, T_{\Gamma}^4, F, \Psi); \\ Q_{\text{г.ух}} &= f_2(B, \Sigma V_i, c'_{\text{р.г.ух}}, t_{\text{г.ух}}). \end{aligned} \quad (7)$$

Как видим, члены (7) являются нелинейными функциями исходных переменных  $m, p_{\text{к}}, t_{\text{кл}}(t), t_{\text{г.ух}}(t)$ , вследствие чего (4) нелинейно.

Для дальнейшего исследования системы автоматического регулирования зоны необходимо выполнить линеаризацию отмеченных выше функций [1]:

$$\begin{aligned} B &= f_1(m, p_{\text{к}}); \quad Q_{\text{о.к}} = f_2(t); \quad Q_{\text{г.ух}} = f_3(B, t) \\ \text{или } Q_{\text{г.ух}} &= f_4(m, p_{\text{к}}, t). \end{aligned}$$

Имеем:

$$\begin{aligned} \Delta B &= \frac{\partial f_1}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial f_1}{\partial p_{\text{к}}} \Delta p_{\text{к}}; \quad \Delta Q_{\text{о.к}} = \frac{\partial f_2}{\partial t} \Delta t; \\ \Delta Q_{\text{г.ух}} &= \frac{\partial f_4}{\partial m} \Delta m + \frac{\partial f_4}{\partial p_{\text{к}}} \Delta p_{\text{к}} + \frac{\partial f_4}{\partial t} \Delta t. \end{aligned} \quad (8)$$

Выполним подстановку в (4)

$$\begin{aligned} G_{\text{пр}} c_{\text{р.пр}} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= Q_{\text{H}}^{\text{p}} \frac{\partial f_1}{\partial m} \Delta m + Q_{\text{H}}^{\text{p}} \frac{\partial f_1}{\partial p_{\text{к}}} \Delta p_{\text{к}} - \frac{\partial f_2}{\partial t} \Delta t - \frac{\partial f_4}{\partial m} \Delta m - \\ &\quad - \frac{\partial f_4}{\partial p_{\text{к}}} \Delta p_{\text{к}} - \frac{\partial f_4}{\partial t} \Delta t. \end{aligned}$$

И

$$\begin{aligned} G_{\text{пр}} c_{\text{р.пр}} \frac{\partial t}{\partial \tau} + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} + \frac{\partial f_4}{\partial t} \right) \Delta t &= \left( Q_{\text{H}}^{\text{p}} \frac{\partial f_1}{\partial m} - \frac{\partial f_4}{\partial m} \right) \Delta m + \\ &\quad + \left( Q_{\text{H}}^{\text{p}} \frac{\partial f_1}{\partial p_{\text{к}}} - \frac{\partial f_4}{\partial p_{\text{к}}} \right) \Delta p_{\text{к}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Деля почленно (9) на величину  $(BQ_H^p)_{\max}$  и переходя к относительным переменным, запишем

$$\begin{aligned} & \frac{G_{\text{пр}} c_{\text{р.пр}} t_H}{(BQ_H^p)_{\max}} \frac{\partial \Delta t}{t_H} + \frac{t_H}{(BQ_H^p)_{\max}} \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} + \frac{\partial f_4}{\partial t} \right) \frac{\Delta t}{t_H} = \\ & = \frac{m_{\max}}{(BQ_H^p)_{\max}} \left( Q_H^p \frac{\partial f_1}{\partial m} - \frac{\partial f_4}{\partial m} \right) \frac{\Delta m}{m_{\max}} + \frac{p_k}{(BQ_H^p)_{\max}} \left( Q_H^p \frac{\partial f_1}{\partial p_k} - \frac{\partial f_4}{\partial p_k} \right) \frac{\Delta p_k}{p_k}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $t_H$  – заданная (номинальная) температура продуктов сгорания в зоне;  $m_{\max}$  – максимальное открытие регулирующего органа;  $p_k$  – номинальное давление топлива в коллекторе перед горелочным устройством.

Последнее выражение переписываем, вводя обозначения:

$$\begin{aligned} & \frac{G_{\text{пр}} c_{\text{р.пр}} t_H}{(BQ_H^p)_{\max}} = T; \quad \frac{t_H}{(BQ_H^p)_{\max}} \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} + \frac{\partial f_4}{\partial t} \right) = A; \\ & \frac{m_{\max}}{(BQ_H^p)_{\max}} \left( Q_H^p \frac{\partial f_1}{\partial m} - \frac{\partial f_4}{\partial m} \right) = a_1; \quad \frac{p_k}{(BQ_H^p)_{\max}} \left( Q_H^p \frac{\partial f_1}{\partial p_k} - \frac{\partial f_4}{\partial p_k} \right) = a_2; \\ & \frac{\Delta t}{t_H} = \varphi; \quad \frac{\Delta m}{m_{\max}} = \mu; \quad \frac{\Delta p_k}{p_k} = \lambda, \end{aligned}$$

где  $T$  – время регулирования объекта;  $A$  – саморегулирование объекта;  $a_1$  – коэффициент эффективности регулирующего воздействия;  $a_2$  – коэффициент эффективности возмущающего воздействия;  $\varphi$  – относительное изменение регулируемой величины;  $\mu$  – то же регулирующего воздействия;  $\lambda$  – то же возмущающего воздействия.

Поскольку  $\frac{\partial f_2}{\partial t} > 0$  и  $\frac{\partial f_4}{\partial t} > 0$ , то и  $A > 0$ . Следовательно, зона печи обладает положительным саморегулированием.

Так как  $Q_H^p \frac{\partial f_1}{\partial m} > \frac{\partial f_4}{\partial m}$  и  $Q_H^p \frac{\partial f_1}{\partial p_k} > \frac{\partial f_4}{\partial p_k}$ , то коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  – положительны.

Установив, что объекту («зона печи – горелочное устройство») присуще положительное саморегулирование, запишем уравнение общей тепловой нагрузки объекта, которое может быть положено в основу построения схемы регулирования.

Для многозонного объекта регулирования уравнение теплового баланса может быть представлено следующим образом:

$$Q_{\Sigma} = \frac{Q_1 + \Sigma Q_i}{\eta_{\text{и.т}}}, \quad (11)$$

где  $\eta_{\text{и.т}}$  – коэффициент использования топлива [2].

В свою очередь

$$Q_1 = pc_{p,m}(\bar{t}_{m,\text{выгр}} - \bar{t}_{m,\text{загр}})\tau',$$

где  $p$  – масса одной заготовки (единицы садки);  $c_{p,m}$  – теплоемкость садки;  $\bar{t}_{m,\text{выгр}}$ ,  $\bar{t}_{m,\text{загр}}$  – температура садки на выходе и входе в зону печи;  $\tau'$  – темп выдачи садки из печи (зоны).

Также имеем:

$$\begin{aligned} c_{p,m}(\bar{t}_{m,\text{выгр}} - \bar{t}_{m,\text{загр}}) &= \Delta h; \\ Q_1 &= p\Delta h\tau'. \end{aligned} \quad (12)$$

Величина  $\eta_{\text{и.т}}$ , входящая в (11), запишется следующим образом:

$$\eta_{\text{и.т}} = \frac{h_m + h_b + h_t - h_{\text{г.ух}}}{h_m} \quad (13)$$

или

$$\eta_{\text{и.т}} = \frac{h_m + \frac{V'_0}{\Sigma V_i} c'_{p,b} t_b + \frac{1}{\Sigma V_i} c'_{p,t} t_t - c'_{p,\text{г.ух}} t_{\text{г.ух}}}{h_m}.$$

Вводим обозначения:

$$\frac{V'_0 c'_{p,b}}{\Sigma V_i h_m} = k_1; \quad \frac{c'_{p,t}}{\Sigma V_i h_m} = k_2; \quad \frac{c'_{p,\text{г.ух}}}{h_m} = k_3; \quad Q_i = \text{const} = A. \quad (14)$$

Выполнив подстановку (14) в (11), получим

$$Q_\Sigma = \frac{P\Delta h\tau' + A}{1 + k_1 t_b + k_2 t_t - k_3 t_{\text{г.ух}}}. \quad (15)$$

Формула (15) может служить основой для разработки схемы автоматического воздействия на горелочное устройство при регулировании тепловой нагрузки зоны. Однако следует особо отметить, что уравнение регулирования тепловой нагрузки содержит воздействие на регулирующий орган горелочного устройства по температуре воздуха-окислителя.

## ВЫВОД

Показано, что рассматриваемый объект регулирования имеет положительное саморегулирование. Записанное уравнение автоматического регулирования тепловой нагрузки (15) содержит член  $k_1 t_b$ , который необходимо учитывать при разработке блок-схем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленные теплотехнологии: моделирование нелинейных процессов: учеб. / В. И. Тимошпольский [и др.]; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, А. П. Несенчука. – Минск: Вышэйш. шк., 2000.

2. Промышленные теплотехнологии: машиностроительное и металлургическое производство: учеб.: в 2 ч. – Ч. 2 / А. П. Несенчук [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука, В. И. Тимошпольского. – Минск: Вышэйш. шк., 1997.

Представлена кафедрой  
ПТЭ и Т

Поступила 24.04.2007

УДК 621.165

## **К ВЫБОРУ МЕТОДА РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ ОТ ТЭЦ**

**Канд. техн. наук СЕДНИН А. В., асп. МАРЧЕНКО П. Ю.**

*Белорусский национальный технический университет*

Состояние энергетической отрасли оказывает огромное влияние на экономическое развитие страны и показатели социальной жизни населения. Прогнозируемые темпы роста национальной экономики выдвигают значительные требования к экономичности и надежности энергоснабжения. Кроме того, постоянный и стабильный рост цены на экспортируемое органическое топливо обуславливает необходимость экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в стране. Значительная экономия при производстве электрической энергии достигается за счет применения комбинированной выработки электрической и тепловой энергии (теплофикации) [1]. Более 50 % установленных мощностей республики приходится на ТЭЦ, обеспечивающих выработку наиболее дешевой электроэнергии – на тепловом потреблении.

Однако изменения, произошедшие за последние годы в структуре тепловых нагрузок, отразились на режимах работы станций и снизили системную эффективность производства электроэнергии. Эти изменения характеризуются следующими факторами:

- уменьшением потребления тепловой энергии промышленными предприятиями за счет снижения объемов производства;
- введением перекрестного субсидирования, что стало одной из причин строительства на промышленных предприятиях собственных котельных и миниТЭЦ в зоне действия крупных промышленно-отопительных ТЭЦ;
- изменением структуры суточной тепловой нагрузки.

Снижение промышленной тепловой нагрузки вызвало увеличение влияния на график отпуска теплоты от станции нагрузки коммунально-бытового сектора. Изменение структуры тепловых нагрузок для большинства станций довольно существенно. Например, для Минской ТЭЦ-4 (МТЭЦ-4) нагрузка коммунально-бытового сектора с 55 % в 1980 г. возросла до 85 % в 2005 г. (табл. 1). При этом 40 % этой нагрузки составляет