

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МНОГО РЕЖИМНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДИНАМИКИ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА БАРАБАННОГО КОТЛА
СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Ложечников В.Ф., Михайленко В.С., Максименко И.Н.

Повышение экономичности работы теплоэнергетического оборудования за счет повышения технического уровня систем автоматического управления возможно по двум основным направлениям: использование современного комплекса технических средств (компьютеризированные управляющие комплексы с надежными, высокоточными, мало инерционными датчиками технологических параметров) и усовершенствование структурных схем систем автоматического регулирования (как правило, за счет введения в контур контроля дополнительных информационных сигналов об изменении технологических параметров или использование более сложного алгоритма управления [1]).

Большой интерес представляют технические решения, которые без привлечения значительных средств позволяют снизить потребление топлива и уменьшить выбросы вредных веществ в окружающую среду. Исследования, проведенные в США в 1990-1997 годах, показали, что повышение точности регулирования соотношения топливо-воздух позволяет повысить эффективность энергосбережения на 2 - 20%.

На энергетических и промышленных предприятиях Украины в настоящее время идет процесс замены аналоговых систем управления на цифровые. Однако, возможности, которые предоставляют современные технические средства автоматизации, используются не полностью. В частности, на новой технике реализуются типовые схемы и алгоритмы управления, которые были разработаны более 30 лет назад с учетом ограниченных возможностей аналоговых систем управления.

Современный подход к концепции автоматического управления связан с рассмотрением объекта управления в виде сложной динамической системы с определенным числом входов и выходов. Расчет управляющего воздействия происходит с учетом прямых и перекрестных связей между управляющими воздействиями и регулируемым параметрами. Рассчитанное управляющее воздействие должно обеспечить минимум заданному критерию качества вида

$$J = \int_0^{\infty} (x^T \cdot Q \cdot x + u^T \cdot R \cdot u) \cdot dt \quad (1)$$

где x – вектор внутреннего состояния объекта управления; u – вектор управляющего воздействия, Q и R – весовые матрицы.

Для решения задачи оптимального управления в соответствии с заданным критерием качества необходима математическая модель, которая адекватно описывает поведение объекта управления во всем диапазоне изменения нагрузок.

Анализ разработанной математической модели динамики барабанного котла [2] показал, что наряду с медленно изменяющимися регулируемым параметрами (давление пара в паропроводе, солесодержание котловой воды) в объекте управления присутствуют мало инерционные каналы по разрежению дымовых газов в топочной камере и концентрации кислорода в уходящих газах. При большой размерности математической модели и большом численном различии собственных значений матрицы A , которое обусловлено сильным различием скорости протекания переходных процессов в барабанном котле, возникают вычислительные трудности при нахождении матрицы регулятора системы K . Кроме того, при включении многомерной системы регулирования все выходы системы должны быть одновременно замкнуты с ее входами, и, в случае отказа одного из каналов управления или измерения, а также, переводе части контролируемых параметров на ручное управление, переходные процессы регулирования в системе могут стать неустойчивым.

Газо-воздушный тракт барабанного котла состоит из газохода и воздуховода. Регулируемыми параметрами для этого участка являются: разрежение дымовых газов в верхней части топочной камеры и избыток воздуха, характеризующий экономичность процесса горения.

При выводе дифференциальных уравнений газохода и воздуховода, как участков регулирования разрежения в топке, были приняты следующие допущения: газоход после дымососа и воздуховод после дутьевого вентилятора очень короткий и что обратная реакция давления в топке на расход мазута и воздуха на входе пренебрежимо мала; аккумулирующая емкость топки и газоходов сосредоточена в одном объеме, а дроселирующая способность газоходов и поверхностей нагрева сосредоточена в одной точке. Регулирование осуществляется путем изменения положения направляющего аппарата дымососа и дутьевого вентилятора. С учетом перечисленных допущений регулируемые участки могут быть заменены упрощенной системой, состоящей из емкости, дросселя и дымососа (дутьевого вентилятора).

Регулируемой величиной является отклонение давления в топке ΔP_p от заданного значения; входной величиной (регулирующим воздействием) – изменение положения направляющего аппарата дымососа $\Delta \varphi_r$. В качестве внешнего возмущения примем изменение расхода уходящих газов на притоке ΔM . Таким образом, дифференциальное уравнение участка имеет вид:

$$T_2 \Delta \ddot{P}_p + T_1 \Delta \dot{P}_p + \Delta P_p = k_4 \Delta \dot{\varphi}_r + k_3 \Delta \varphi_r + k_2 \Delta \dot{M} + k_1 \Delta M. \quad (2)$$

Динамические свойства воздуховода, определяющие зависимость между изменением подачи воздуха в топку котла и положением направляющего аппарата дутьевого вентилятора $\Delta \varphi_B$, описываются уравнением вида:

$$T_4 \Delta \ddot{M}_L + T_3 \Delta \dot{M}_L + \Delta M_L = k_6 \Delta \dot{\varphi}_B + k_5 \Delta \varphi_B. \quad (3)$$

Коэффициент избытка воздуха λ , который нельзя непосредственно измерить, может быть определен по содержанию кислорода в дымовых газах C_{O_2} практически независимо от состава топлива. Коэффициент избытка воздуха определяется расходом воздуха M_L и расходом топлива M_B . Однако на практике C_{O_2} не удается измерить в точке, расположенной непосредственно за зоной окончания процесса горения. В большинстве случаев точка отбора пробы находится в конвективной части котла. При этом газы первоначально перемешиваются в зоне горения, затем транспортируются через радиационные поверхности и затем дополнительно перемешиваются в зоне конвективных поверхностей нагрева. Глубокое перемешивание происходит в дымососе (особенно в дымососах центробежного типа). Во многих случаях эта сложная при детальном описании схема может быть аппроксимирована уравнением:

$$T_6 \Delta \ddot{C}_{O_2} + T_5 \Delta \dot{C}_{O_2} + \Delta C_{O_2} = k_8 \Delta M_L (t - \tau) + k_7 \Delta M_B (t - \tau); \quad (4)$$

где τ – время транспортного запаздывания; (принимается равным величине инерционности самого газоанализатора).

Таким образом, регулируемыми параметрами газозвоздушного тракта барабанного котла являются отклонение от номинального значения концентрации кислорода в уходящих газах ΔC_{O_2} и отклонение разрежения в топочной камере, управляющими воздействиями – изменение положения направляющих аппаратов дутьевого вентилятора $\Delta \varphi_B$ и дымососа $\Delta \varphi_r$, возмущающим воздействием – изменение расхода топлива ΔM_B (рис. 1).

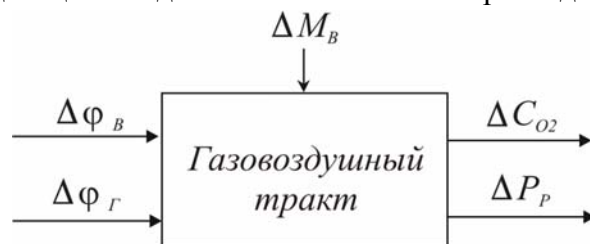


Рис. 1 Параметрическая схема газозвоздушного тракта

Численные значения коэффициентов дифференциального уравнения (2) определяются с помощью следующих соотношений:

$$T_1 = (2a_L^{\Gamma} + 2a_P^{\Gamma}) \frac{m_{\Gamma}}{\bar{P}_{\Gamma}} \alpha; T_2 = ((a_L^{\Gamma})^2 + 2a_P^{\Gamma} a_L^{\Gamma}) \left(\frac{m_{\Gamma}}{\bar{P}_{\Gamma}} \alpha \right)^2; k_3 = -b_P^{\Gamma}; k_1 = a_L^{\Gamma} + a_P^{\Gamma};$$

$$k_2 = ((a_L^{\Gamma})^2 + a_L^{\Gamma} a_P^{\Gamma}) \frac{m_{\Gamma}}{2\bar{P}_{\Gamma}} \alpha; k_4 = -a_L^{\Gamma} b_P^{\Gamma} \frac{m_{\Gamma}}{2\bar{P}_{\Gamma}} \alpha,$$

где m_{Γ} – масса дымовых газов в газоходе котла в стационарном режиме работы, кг; \bar{P}_{Γ} – давление дымовых газов в верхней части топочной камеры, Па; α – коэффициент (для газа ~ 0.85), $a_L^{\Gamma} = \frac{\Delta H_M}{\Delta Q}$, $b_P^{\Gamma} = \frac{\Delta H_{\Phi}}{\Delta \varphi}$, $a_P^{\Gamma} = \frac{\Delta H^F}{\Delta Q^F}$ – определяются графически по расходным характеристикам воздуховода и вентилятора (рис. 2).

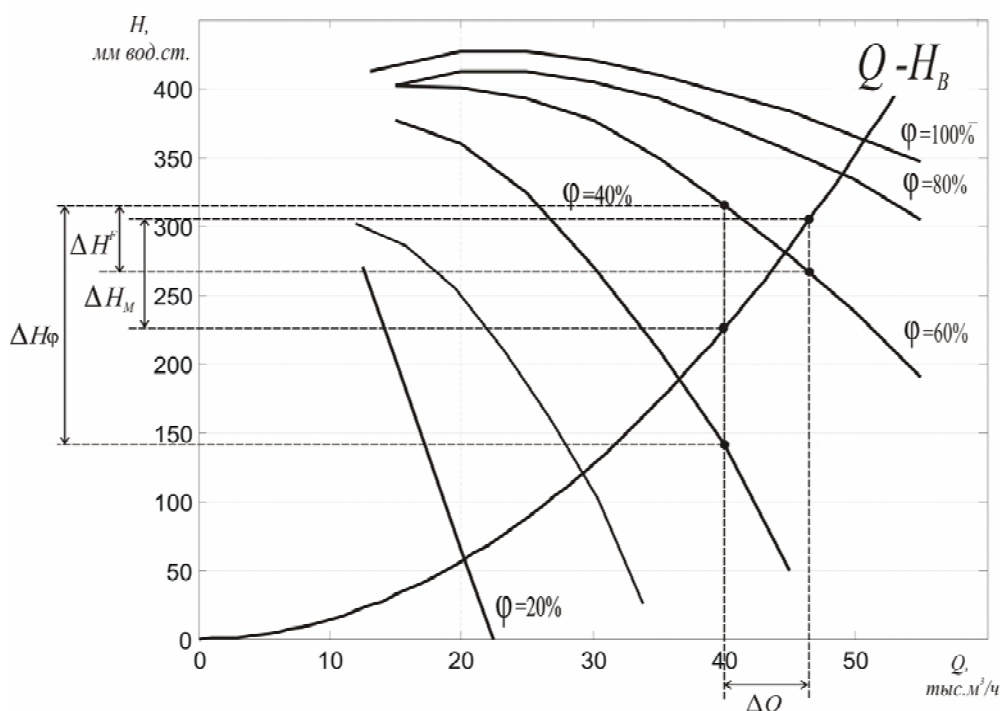


Рис. 2 Напорные характеристики вентилятора и воздуховода

Численные значения коэффициентов дифференциального уравнения (3) определяются с помощью следующих соотношений:

$$T_4 = \frac{a_P^B (a_L^B)^2}{a_L^B + a_P^B} \left(\frac{m_B}{2\bar{P}_B} \alpha \right)^2; T_3 = \frac{2a_P^B a_L^B + (a_L^B)^2}{a_L^B + a_P^B} \left(\frac{m_B}{\bar{P}_B} \alpha \right); k_6 = \frac{b_P^B a_L^B}{a_L^B + a_P^B} \left(\frac{m_B}{2\bar{P}_B} \alpha \right); k_5 = \frac{b_P^B}{a_L^B + a_P^B},$$

где m_B – масса дымовых газов в воздуховоде котла в стационарном режиме работы, кг;

\bar{P}_B – среднее значение давления воздуха в воздуховоде, Па, $a_L^B = \frac{\Delta H_M}{\Delta Q}$, $b_P^B = \frac{\Delta H_{\Phi}}{\Delta \varphi}$,

$a_P^B = \frac{\Delta H^F}{\Delta Q^F}$ – определяются графически по расходным характеристикам газохода и дымохода (рис. 3).

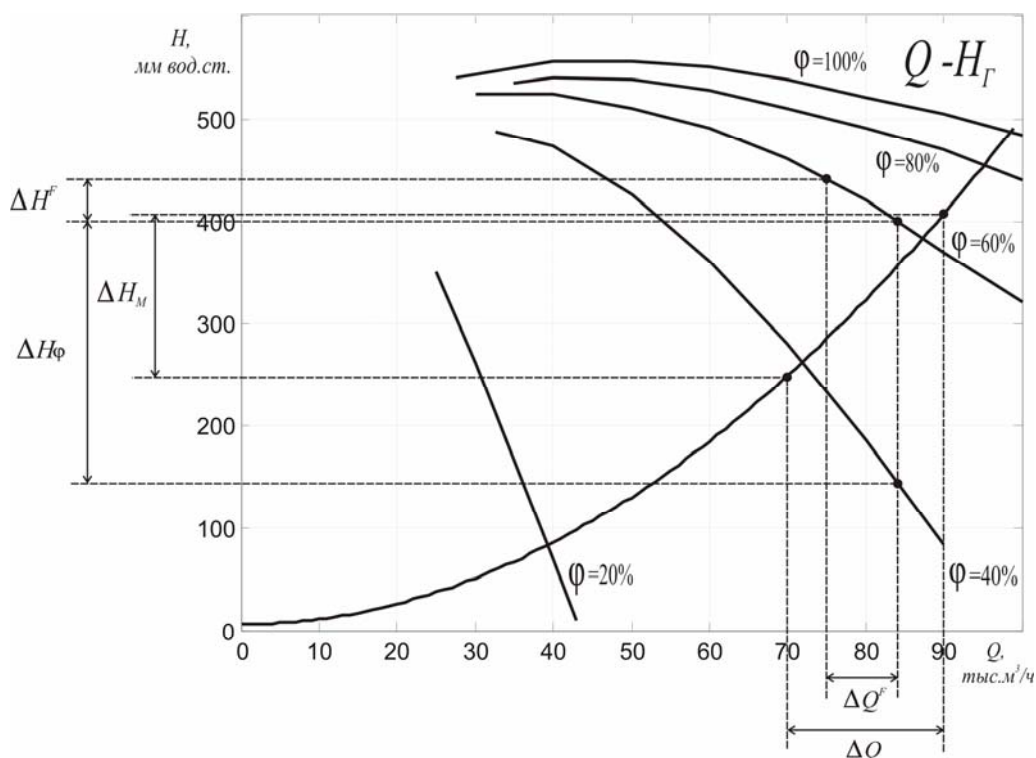


Рис. 3 Напорные характеристики дымососа и газохода

Дифференциальное уравнение, описывающее динамику изменения концентрации кислорода ΔC_{O_2} в дымовых газах, параметризуется с помощью следующих соотношений:

$$T_6 = T_B^2; T_5 = 2T_B; T_B = \frac{\bar{T}_B}{3}; k_8 = \frac{21}{M_L \bar{\lambda}}; k_7 = -\frac{21}{M_B \bar{\lambda}};$$

где \bar{M}_B , \bar{M}_L – номинальные расходы топлива и воздуха соответственно, кг/с; $\bar{\lambda}$ – коэффициент избытка воздуха; \bar{T}_B – среднее время прохода дымовых газов от топки до места замера, с.

Поскольку динамические и статические свойства барабанного котла в нестационарных режимах работы являются нелинейными, то для получения многорежимной математической модели, нелинейная модель может быть заменена спектром моделей, линеаризованных относительно нескольких типовых режимов.

Численные значения коэффициентов дифференциальных уравнений (2) ÷ (4) были определены по конструктивным и теплотехническим параметрам газо-мазутного барабанного котла ГМ-50 для трех номинальных режимов, соответствующих 50, 75 и 100% тепловой нагрузки (таблица 1).

Таким образом, многорежимная математическая модель котла, линеаризованная в окрестностях возможных режимов функционирования, может быть представлена системой матричных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i + B_i u + F_i f; \\ y = C x_i; \end{cases} \quad (5)$$

где x_i – вектор внутренних состояний, соответствующих i -му режиму функционирования системы; y – вектор контролируемых параметров (выход системы), u – вектор управляющих воздействий, f – вектор основных возмущений, A_i , B_i , F_i , C – матрицы коэффициентов соответствующих размерностей. Для обеспечения высокого качества моделирования процессов во всем диапазоне изменения нагрузок, следует полагать, что матрицы A_i , B_i , F_i не являются полностью определенными, а принадлежат подмножествам

$A_i \in \bar{A}_i \pm \Delta A_i$, $B_i \in \bar{B}_i \pm \Delta B_i$, $F_i \in \bar{F}_i \pm \Delta F_i$, где $\bar{A}_i, \bar{B}_i, \bar{F}_i$ - номинальные матрицы подмножеств, а $\Delta A_i, \Delta B_i, \Delta F_i$ - матрицы отклонений, такие что $\bar{A}_{i+1} = \bar{A}_i + \Delta A_i$, $\bar{A}_{i-1} = \bar{A}_i - \Delta A_i$, $i=1..n$, где n - число рассматриваемых режимов функционирования, а матрицы $\bar{B}_{i\pm 1}, \bar{F}_{i\pm 1}$ - определяются аналогично.

Таблица 1

Численные значения коэффициентов модели динамики газовоздушного тракта котла ГМ-50

Паропроизводительность, т/ч	Коэффициент						
	$T_1,$ c	$T_2,$ c^2	$T_3,$ c	$T_4,$ c^2	$T_5,$ c	$T_6,$ c^2	$k_1,$ $\frac{Па \cdot c}{кг}$
25	1.67	0.0566	0.0748	$3.47 \cdot 10^{-4}$	16	56	1080
37.5	1.33	0.0574	0.112	$8.16 \cdot 10^{-4}$	16	56	861
50	1.04	0.0572	0.152	$7.22 \cdot 10^{-4}$	16	56	673
Паропроизводительность, т/ч	Коэффициент						
	$k_2,$ $\frac{Па \cdot c^2}{кг}$	$k_3,$ $\frac{Па}{\%}$	$k_4,$ $\frac{Па \cdot c}{\%}$	$k_5,$ $\frac{кг \cdot c}{\%}$	$k_6,$ $\frac{кг \cdot c^2}{\%}$	$k_7,$ $\frac{\% \cdot c}{кг}$	$k_8,$ $\frac{\% \cdot c}{кг}$
25	80.3	-278	-20.6	0.224	$4.55 \cdot 10^{-3}$	-39.8	2.74
37.5	87.6	-254	-25.8	0.178	$6.73 \cdot 10^{-3}$	-26.5	1.82
50	106	-125	-19.7	0.147	$6.71 \cdot 10^{-3}$	-19.9	1.37

Полученная математическая модель газовоздушного тракта котла средней мощности (параметризованная для барабанного котла ГМ-50) позволят исследовать возможности применения новых алгоритмов управления, в том числе оптимального многомерного управления. Предпосылкой для применения этого способа управления технологическим процессом является замена на энергетических и промышленных предприятиях Украины аналоговых регуляторов на микропроцессорные управляющие комплексы.

The structure of many-dimensional analytical multiplemode mathematical model and the expressions stating the coefficients of the gas-air tract of average power drum-type boiler is considered. The obtained model can be applied in constructing a modern high-quality computer control system of the boiler.

1. Кокорев С.В., Давыдов Н.И., Анисяев Е.М. Разработка, исследование и испытание системы регулирования разрежения в топке котла-утилизатора комплекса по обезвреживанию и переработке твердых бытовых и биологических отходов // Электрические станции. - 2006. - С. 38-42.

2. Ложечников В.Ф., Стопакевич А.А. Структура многомерной математической модели динамики барабанного котла средней мощности // Оптимизация управления, информационные системы и компьютерные технологии: Труды Украинской академии экономической кибернетики (Южный научный центр). - Киев-Одесса: ИСЦ, 1999. - Вып.1. - Ч.2. - С. 167-176.