

УДК 681.5.015.23:658.264

В.Ф. ЛОЖЕЧНИКОВ, Ю.М. ЛЮТЕНКО
Одесский Национальный Политехнический Университет**ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОЙ АСУ ГАЗО-ВОЗДУШНЫМ ТРАКТОМ БАРАБАННОГО КОТЛА**

Рассмотрена возможность расширения математической модели динамики газо-воздушного тракта барабанного котла за счет добавления участка по тепловыделению в топочной камере. По расширенной математической модели синтезирована многомерная оптимальная система управления технологическим участком и исследована ее работа. Также представлены показатели качества переходных процессов в сконструированных оптимальных системах управления

Ключевые слова: барабанный котел, автоматическая система управления, сигнал по тепловыделению, топочная камера.

В.Ф. ЛОЖЕЧНИКОВ, Ю.М. ЛЮТЕНКО
Одеський Національний Політехнічний Університет**ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНОЇ АСУ ГАЗО-ПОВІТРЯНИМ ТРАКТОМ БАРАБАННОГО КОТЛА**

Розглянуто можливість розширення математичної моделі динаміки газоповітряного тракту барабанного котла за рахунок додавання ділянки з тепловиділення у топковій камері. З отриманої моделі синтезована багатовимірні оптимальна систему управління технологічною ділянкою, та досліджена її робота. Наведені показники якості перехідних процесів у сконструйованих оптимальних системах управління.

Ключові слова: барабанный котел, автоматична система управління, сигнал з тепловиділення, топкова камера.

V.F. LOZHECHNIKOV, Y.M. LYUTENKO
Odessa National Polytechnic University**PECULIARITIES OF SYNTHESIS OF THE OPTIMAL ACS WITH GAS-AIR TRACT OF THE DRUM BOILER**

The possibility of expanding the mathematical model of the dynamics of the gas-air tract of the drum-type boiler by adding a section for heat release in the combustion chamber is considered.

Thus, there is a scientific and technical task to expand the range of operation of the automatic control system for the gas-air path, for the possibility of burning fuel with variable calorific value. To synthesize the optimal control system, the mathematical model of the gas-air path was supplemented by a model of measuring converters in the control channels of controlled parameters (inertial link with transport delay). The peculiarity of the designed control system is the use of the heat release signal in the combustion chamber. When non-certificated fuel starts to flow to the burners and the signal of its mass or volume flow continues to flow to the input of the compensator of the measured disturbance, the static control error will increase. The heat signal allows more accurately to determine the amount of air supplied to the burners. It should be noted that the heat signal is an indirect measurement and is formed on the basis of a direct measurement of the pressure and the flow rate of superheated steam. Therefore, the accuracy of the measuring transducers and their inertia will also influence the quality of the transient control processes.

According to the extended mathematical model, a multidimensional optimal control system for a technological site was synthesized and its work was investigated. The indicators of the quality of transient processes in the designed optimal control systems were presented.

Based on the results of the simulation, it can be concluded that the only drawback of the ACS with the optimal state controller and the compensator of the measured disturbances is the need for an indirect measurement of the disturbance and the presence of a static control error.

Keywords: drum boiler, automatic control system, heat release signal, combustion chamber.

Постановка проблемы

Повышение экономичности работы оборудования тепловых электрических станций за счет повышения технического уровня систем автоматического управления возможно по двум основным направлениям: использование современного комплекса технических средств (компьютеризированные управляющие комплексы) и усовершенствование принципиальных схем систем автоматического управления (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 и ЕС, показали, что повышение точности регулирования соотношения топливо-воздух позволяет повысить эффективность энергосбережения от 2 до 20%.

На энергетических и промышленных предприятиях Украины к настоящему времени завершился процесс замены аналоговых систем управления на цифровые микропроцессорные комплексы. 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 полувека лет назад с учетом ограниченных возможностей аналоговых систем управления.

В настоящее время на тепловых электростанциях, оснащенных барабанными котлами, промышленных и теплофикационных котельных для управления газо-воздушным трактом используются локальные АСР общего воздуха и разрежения. Задача АСР общего воздуха состоит в синхронном изменении расхода воздуха на горелочные устройства при изменении расхода топлива. Как правило, в типовой АСР общего воздуха (экономичности процесса горения) на вход регулирующего устройства поступают корректирующий сигнал по расходу топлива (жидкого или газообразного) и сигнал отрицательной обратной связи по расходу воздуха. Точное измерение массового расхода воздуха, в отличие от измерения расхода топлива, затруднено, поскольку для его определения используют сигнал переменного перепада давления воздуха на воздухоподогревателе. Поскольку по перепаду давления на воздухоподогревателе технически сложно точно определять массовый расход воздуха во всем диапазоне рабочих нагрузок котлоагрегата, то точность поддержания материального баланса между расходом топлива и воздуха проверяется по газоанализатору, который измеряет содержание кислорода O_2 в уходящих газах. На основании показаний газоанализатора оператор вручную изменяет задания регулятору общего воздуха для приведения содержания O_2 к норме.

Для уменьшения динамического отклонения разрежения в топочной камере при изменении тепловой нагрузки котлом, для регулирования применяют комбинированную АСУ с устройством ввода основного внешнего возмущающего воздействия по расходу воздуха через воздухоподогреватель. В качестве сигнала по расходу воздуха используют либо перепад давления воздуха на воздухоподогревателе или положение направляющего аппарата дутьевого вентилятора, которое в результате большой нелинейности не позволяет точно определять расход воздуха.

Таким образом, возникает научно-техническая задача исследования возможности применения оптимальных регуляторов для управления типовыми технологическими процессами и создания на их основе современной АСУ, которая не содержит недостатков типовых систем регулирования и максимально реализует потенциал цифровых управляющих комплексов.

Анализ последних исследований и публикаций

Современный подход к концепции автоматического управления связан с рассмотрением объекта управления в виде сложной динамической системы с определенным числом взаимосвязанных между собой входов и выходов. В многомерной концепции управления расчет управляющего воздействия происходит с учетом прямых и перекрестных связей между вектором управления и вектором контролируемых технологических параметров. 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 рабочих нагрузок объекта управления.

Анализ разработанной математической модели динамики барабанного котла [2] показал, что наряду с медленно изменяющимися регулируемыми 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 (матрица внутреннего состояния объекта управления), которое обусловлено сильным различием скорости протекания переходных процессов в барабанном котле, возникают вычислительные трудности при нахождении матрицы K многомерного регулятора системы.

В зависимости от вида используемого топлива (жидкое, твердое, газообразное, с переменной теплотворной способностью), применяются типовые схемы автоматизации для стабилизации параметров газо-воздушного тракта. Различие заключается в том, какая группа технологических параметров измеряется и обрабатывается по определенному алгоритму расчета управляющего воздействия [3].

Если используется топливо с переменным химическим составом, то для повышения эффективности процесса горения можно сжигать искусственные газы в газотурбинных с усовершенствованными камерами сгорания [4]. Модернизация горелочных устройств с целью изменения геометрии факела, также повышает КПД энергоустановки [5].

Цель исследования

Таким образом, возникает научно-техническая задача по расширению диапазона работы автоматической системы управления газо-воздушным трактом, для возможности сжигания топлива с переменной теплотворной способностью.

В газо-воздушный тракт барабанного котла входят следующие конструктивные элементы: газоход, по которому дымовые газы проходят от топочной камеры до дымовой трубы, и воздуховод, по которому воздух подается на горелочные устройства. Регулируемыми параметрами для этого участка являются: разрежение дымовых газов в верхней части топочной камеры и избыток воздуха, характеризующий экономичность процесса горения. Использование сигнала по тепловыделению может обеспечить дополнительную информацией систему управления, когда используется несертифицированное топливо. Поэтому необходимо дополнить математическую модель дифференциальными уравнениями, которые описывают изменение давления в барабане котла и расход перегретого пара.

Изложение основного материала исследования

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

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

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

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

Коэффициент избытка воздуха λ , который нельзя непосредственно измерить, может быть определен по концентрации кислорода в дымовых газах C_{O_2} практически независимо от состава топлива. Однако на практике C_{O_2} не удастся 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. Во многих случаях эта сложная при детальном описании схема может быть аппроксимирована уравнением:

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

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

Таким образом, регулируемыми параметрами газо-воздушного тракта барабанного котла являются отклонение от номинального значения концентрации кислорода в уходящих газах ΔC_{O_2} и отклонение разрежения в топочной камере, а управляющими воздействиями – изменение положения направляющих

аппаратов дутьевого вентилятора $\Delta\varphi_B$ и дымососа $\Delta\varphi_\Gamma$; основным внешним возмущающим воздействием является изменение расхода топлива ΔM_B .

Возмущение изменением калорийности топлива устраняется в типовой АСУ регулятором топлива, использующим в обратной отрицательной связи сигнал по теплоте $\Delta Q_T^{ИЗМ} = C_{II} \frac{dP_b}{dt} + \Delta D_{III}$, где C_{II} – постоянный коэффициент, характеризующий массовую аккумулирующую способность пароводяной смеси и металла испарительной части котла.

Уравнение зависимости давления пара в барабане котла ΔP_b от количества тепла, полученного пароводяной смесью, и расходом пара к потребителю ΔD_{III} :

$$T_B \Delta \dot{P}_b = k_T \Delta Q_T + k_D \Delta D_{III}, \quad (5)$$

где T_B – инерционность процесса генерации пара в барабане котла, k_T , k_D – коэффициенты передачи между тепловосприятием и тепловой нагрузкой соответственно.

Уравнения для паропровода от барабана котла к потребителю:

$$T_{III} \Delta \dot{P}_{III} + \Delta P_{III} = k_{III} \Delta P_b; \quad (6)$$

$$T_{III} \Delta \dot{D}_{III} + \Delta D_{III} = k_{ID} \Delta P_b, \quad (7)$$

где T_{III} – инерционность паропровода, k_{III} , k_{ID} – коэффициенты передачи между изменением давления в барабане котла и изменением давления и расхода перегретого пара соответственно.

Таким образом, математическая модель газовоздушного тракта энергетического котла может быть представлена системой матричных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x} = \bar{A}_i \cdot x + \bar{B}_i \cdot u + \bar{F}_i \cdot f; \\ y = \bar{C} \cdot x; \end{cases} \quad (8)$$

где x – вектор внутренних состояний, соответствующих i -ому режиму функционирования системы; y – вектор контролируемых параметров (выход системы), u – вектор управляющих воздействий, f – вектор основных возмущений, \bar{A}_i , \bar{B}_i , \bar{F}_i , \bar{C} – матрицы коэффициентов соответствующих размерностей.

Для синтеза оптимальной системы управления математическая модель газо-воздушного тракта (5) необходимо расширить моделью измерительных преобразователей в каналах контроля регулируемых параметров (инерционное звено с транспортным запаздыванием).

Для процедуры синтеза цифровой АСУ математическая модель (8) переводится из непрерывной шкалы времени в дискретную и записывается в виде системы разностных уравнений (9) с соответствующим периодом дискретности Δt :

$$\begin{cases} x_{i+1} = A \cdot x_i + B \cdot u_i + F \cdot f_i, \\ y_i = C \cdot x_i; \end{cases} \quad (9)$$

где x_i – вектор внутреннего состояния системы; y_i – вектор выхода (отклонение содержания кислорода в дымовых газах ΔC_{O_2} и разрежения в топочной камере ΔP_p); u_i – изменение управляющего воздействия (положение направляющих аппаратов дутьевого вентилятора $\Delta\varphi_B$ и дымососа $\Delta\varphi_\Gamma$); f_i – возмущающее воздействие (расход топлива ΔM_B и изменение теплотворной способности $\Delta Q_T^{ИГ}$).

Решение поставленной задачи заключается в синтезе оптимального регулятора состояния со статическим компенсатором измеряемого возмущения.

Для этого необходимо минимизировать критерий качества

$$J = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ (z_i - y_i)^T \cdot Q \cdot (z_i - y_i) + u_i^T \cdot R \cdot u_i \right\}. \quad (10)$$

Откуда управляющее воздействие определяется следующим соотношением

$$u_i = -K \cdot x_i + \bar{K}_f, \tag{11}$$

где $P = LQ2(A, B, C^T \cdot Q \cdot C, R)$ – решение уравнения Риккати второго типа, $K = R^{-1} \cdot B^T \cdot P$ – матрица регулятора, $\bar{K}_f = R^{-1} \cdot B^T \cdot [A - I - B \cdot K]^{-T} \cdot P \cdot F$ – матрица компенсатора измеряемого возмущения (расход топлива) (рис. 1).

Особенность сконструированной системы управления заключается в использовании сигнала по тепловыделению в топочной камере. Когда на горелочные устройства начинает поступать несертифицированное топливо, а на вход компенсатора измеряемого возмущения будет продолжать поступать сигнал по его массовому или объемному расходу, то произойдет увеличение статической ошибки регулирования. Сигнал по теплоте позволяет более точно определить количество воздуха, подаваемого на горелочные устройства. Необходимо отметить, что сигнал по теплоте является косвенным измерением и формируется на основе прямого измерения давления и расхода перегретого пара. Поэтому точность измерительных преобразователей и их инерционность, также будут оказывать влияние на качество переходных процессов регулирования. Формирование этого сигнала должно осуществляться в отдельном программном блоке, поскольку $\Delta Q_T^{ИЗМ} = f(\Delta P_b, \Delta D_{III})$.

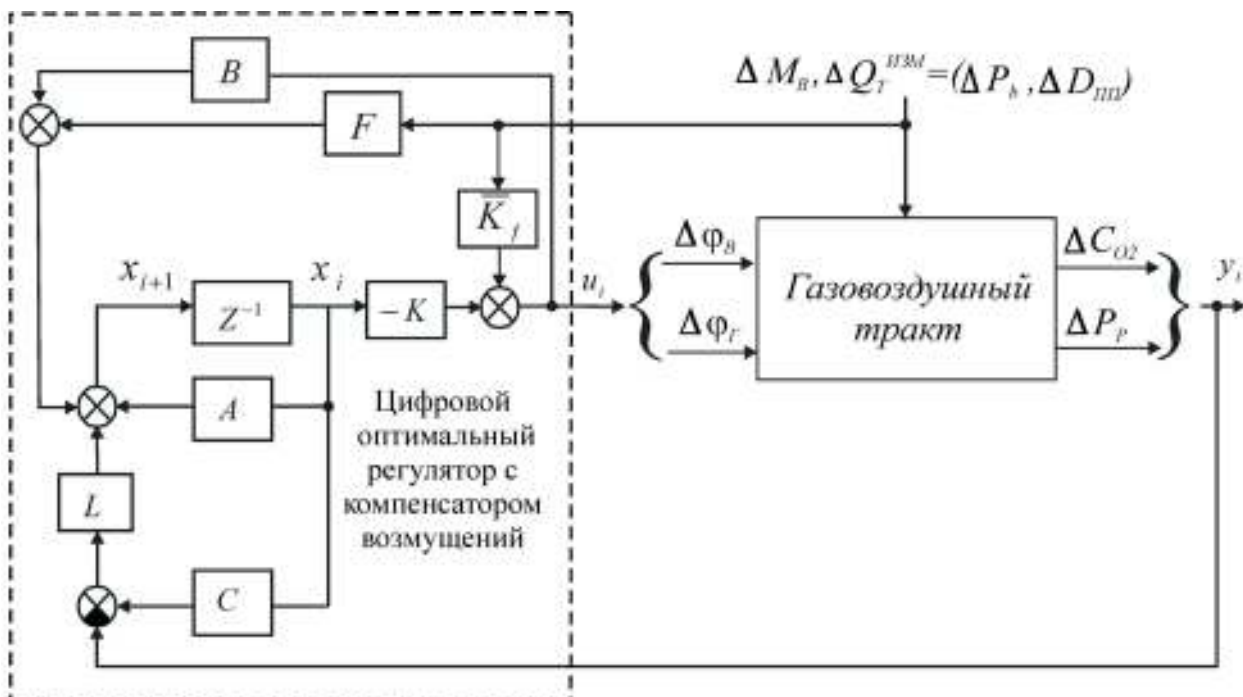


Рис. 1. Структурная схема цифровой оптимальной АСР с компенсатором:

1 – объект управления (газо-воздушный тракт), 2 – цифровая оптимальная АСР со статическим компенсатором измеряемых возмущений

На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что единственным недостатком АСР с оптимальным регулятором состояния и компенсатором измеряемых возмущений является необходимость косвенного измерения возмущающего воздействия и наличие статической ошибки регулирования.

Выводы

Проведенные исследования показали, что для компенсации резких скачкообразных возмущений различной природы, АСУ с компенсатором требует быстрого определения вида возмущающего воздействия.

Таким образом, при выборе для реализации той или иной оптимальной цифровой АСУ необходимо учитывать технологические требования к стабилизируемым параметрам, технические возможности исполнительных механизмов направляющих аппаратов дутьевого вентилятора и дымососа, а также характер изменения основного возмущающего воздействия – расхода топлива или его теплотворной способности.

Список использованной литературы

1. Кокорев С.В. Разработка, исследование и испытания системы регулирования разрежения в топке котла-утилизатора комплекса по обезвреживанию и переработке твердых бытовых и биологических отходов / С.В. Кокорев, Н.И. Давыдов, Е.М. Анисяев // Электрические станции. – 2006. – № 6-1. – С. 38-42.

2. Ложечников В.Ф. Структура многомерной математической модели динамики барабанного котла средней мощности / В.Ф. Ложечников, А.А. Стопакевич // 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.
3. Lozhechnikov V. Synthesis of Multidimensional Optimal Digital Control System of the Gas-Air Tract of Power Boiler / V. Lozhechnikov, O. Ulitskaya // Journal of Automation and Information Sciences. – 2016. – V. 48. – I. 12. – P. 27-36.
4. Tanaka K. Gas turbine combustor technology contributing to environmental conservation / K. Tanaka, K. Nishida, W. Akizuk // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. – 2009. – V. 46, №. 2. – P. 6-12.
5. Яковлев В.А. Испытания работы газогорелочного устройства с принудительной подачей воздуха и целевой камерой / В.А. Яковлев // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9. – С. 299-306.