

В.Н. Ткаченко, А.Л. Красников, Донецк

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НАСТРОЙКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГУЛЯТОРА ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВПРЫСКА ЭНЕРГОБЛОКА СКД 300 МВт

Abstract. Method of PI-controller synthesis based on Lyapunov matrix inequality was described. To overcome possible errors in control for wide range of operating modes gain scheduling was proposed. Set of operating modes for 300 MW supercritical thermal power unit was determined by procedure of subtractive clustering and used for PI-controller synthesis. Proposed gain selection for current operating mode based on interpolation by fuzzy system. Proposed control system was modeled for 170-300 MW demand.

Введение

Котел энергоблока сверхкритического давления (СКД) 300 МВт в основных режимах работы имеет паропроизводительность до 1000 т/ч острого пара температуры 545 °С при давлении 255 кгс/см² [1]. Регулирование температуры пара энергоблока выполняется двумя системами: системой управления расходом топлива и системой управления охлаждающими впрысками, которые должны обеспечить заданную температуру пара с точностью ± 5 °С. Тем не менее, существующие системы управления не всегда способны выдерживать заданную температуру, что часто приводит к аварийным остановкам энергоблока [2]. При этом возникающий перегрев значительно снижает ресурс пароперегревателей.

При синтезе регулятора нужно учитывать нестационарный и нелинейный характер процесса перегрева пара. Возможные варианты построения системы управления включают адаптивные, робастные регуляторы линеаризованных моделей [3], либо регуляторы нелинейного объекта [4].

В работе рассматривается задача построения системы управления охлаждающими впрысками энергоблока СКД, которая включает подсистему настройки регулятора согласно режима функционирования блока. Для анализа функционирования системы выбраны данные функционирования блока в диапазоне нагрузок от 170 до 300 МВт.

Постановка задачи

Для построения регулятора температуры пара охлаждающими впрысками необходимо:

- предложить метод синтеза системы в каждом отдельном режиме работы энергоблока;
- по данным измерений основных параметров пароводяного тракта выделить ограниченный набор режимов функционирования;

- предложить подход к настройке параметров ПИ-регулятора согласно текущему режиму;
- экспериментально исследовать свойства полученной системы управления.

Синтез ПИ-регулятора впрыска

При построении системы управления впрыском представим сегмент пароводяного тракта в виде билинейной системы и выполним синтез ПИ-регулятора на ограниченном множестве состояний [4]. В данном случае, процедура синтеза, основанная на прямом методе Ляпунова, гарантирует устойчивость системы на границах выпуклого многоугольника, задающего множество возможных параметров системы [5].

Для управления системой впрысков введем отдельный контур адаптации, который в текущем режиме будет обеспечивать заданные параметры переходного процесса. Пароводяной тракт представим в виде билинейной системы, разбивая пароводяной тракт на M сегментов:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + (B + N(x))u \\ y = Cx \end{cases}, \quad (1)$$

где x – температуры пара по длине паропровода, y – температура острого пара на выходе, u – расход на впрыск. Матрицы коэффициентов системы равны:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{G}{\Delta l \rho S^c} - \frac{\alpha \pi d}{c \rho S^c} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{G}{\Delta l \rho S^c} & -\frac{G}{\Delta l \rho S^c} - \frac{\alpha \pi d}{c \rho S^c} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{G}{\Delta l \rho S^c} & -\frac{G}{\Delta l \rho S^c} - \frac{\alpha \pi d}{c \rho S^c} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B = \left(0 \dots 0 \frac{h_1 - h_6}{c \Delta l S^c} 0 \dots 0 \right)^T, C = (0 \dots 0 1)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{G \Delta \tau}{\rho S \Delta x} & \frac{\pi d \Delta \tau}{c \rho S} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi d \Delta \tau}{c \rho S} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\pi d \Delta \tau}{c \rho S} \end{bmatrix}, N(x) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & -\frac{1}{\Delta l \rho S^c} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \frac{1}{\Delta l \rho S^c} & -\frac{1}{\Delta l \rho S^c} \end{bmatrix} x$$

где c , ρ – теплоемкость и плотность пара соответственно, рассчитанные при текущей температуре и давлении; α – коэффициент теплоотдачи; d, S^c – диаметр и площадь сечения трубы, Δl – выбранный шаг разбиения по длине паропровода.

Для предложенной системы найдем коэффициенты ПИ-регулятора:

$$u = K_p(x - x^*) + K_I \int (y - y^*) d\tau, \quad (3)$$

решая систему матричных неравенств:

$$Q > 0, \quad (4)$$

$$AQ + QA^T + (N(x_{(i)}) + B)W + W^T(N(x_{(i)}) + B)^T + 2\gamma Q < 0, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x(0)^T \\ x(0) & Q \end{bmatrix} \geq 0, \begin{bmatrix} Q & W^T \\ W & \mu^2 I \end{bmatrix} \geq 0, \quad (6)$$

где матричные неравенства задают:

(4) – положительно определенную матрицу функции Ляпунова ($V(x) = x^T P x, Q = P^{-1}$),

(5) – условие устойчивости системы с ограничением на скорость переходного процесса γ ,

(6) – ограничения управления $\|u\|_Q \leq \mu$.

Решая систему матричных неравенств (4)-(6) в отдельном режиме для ограниченного множества входных температур, можно получить коэффициенты ПИ-регулятора, обеспечивающего заданные свойства $(K_p \ K_I)^T = WQ^{-1}$.

Однако следует учитывать, что такая процедура не гарантирует существования регулятора с заданными свойствами на всем множестве параметров. Так, возможно возникновение значительного перерегулирования в отдельных режимах.

Одним из вариантов построения системы управления нестационарными объектами является реализация отдельного контура настройки коэффициентов регулятора. Решение системы матричных неравенств выполняется итеративными методами и требует значительных временных затрат при повышении размерности системы, что затрудняет процесс адаптации регулятора в реальном времени. Так как непосредственная адаптация и пересчет коэффициентов в реальном масштабе времени затруднительны [6], то типичный подход к построению системы с настройкой коэффициентов регулятора (gain scheduling) заключается в выборе ограниченного набора точек, синтеза регулятора системы линеаризованной в заданных точках, интерполяции полученных коэффициентов регулятора и последующей проверке свойств регулятора [7, 8, 9]. На основе значений, полученных при решении задачи поиска коэффициентов регулятора (3), формируется отдельный контур, который, определяя текущий режим, рассчитывает коэффициенты ПИ-регулятора.

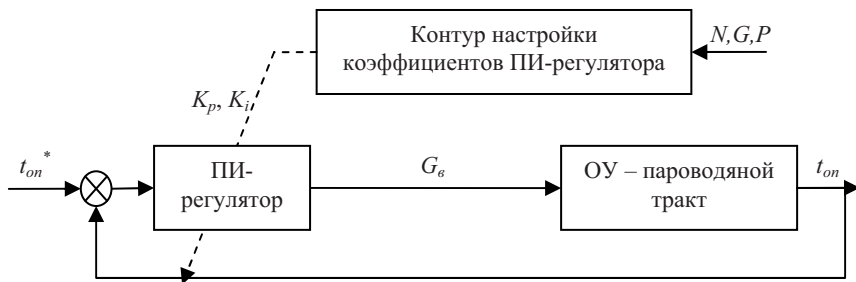


Рис.1. Система управления с подсистемой настройки коэффициентов регулятора

Адаптация коэффициентов регулятора нестационарного объекта управления

Функционирование сегмента пароводяного тракта непосредственно связано с коэффициентом теплоотдачи α , который зависит от текущего расхода пара и режима сжигания топлива. Фактически существует зависимость коэффициента теплоотдачи от мощности энергоблока N , расхода G и давления пара P (рис. 2) $\alpha = g(N, G, P)$.

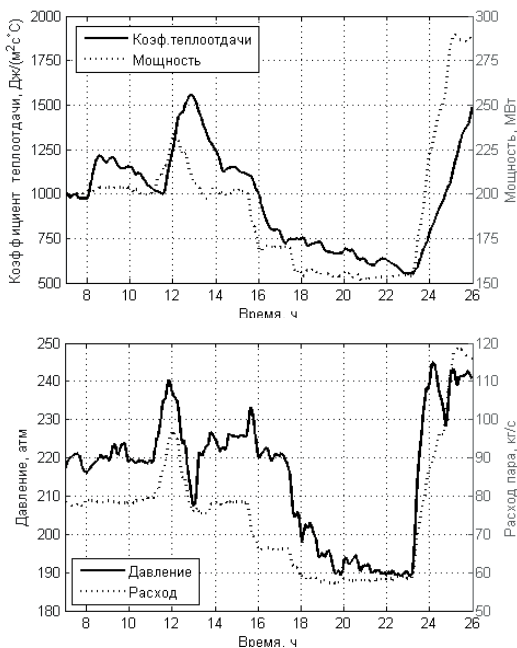


Рис.2. Оперативная идентификация коэффициента теплоотдачи при изменении мощности блока, давления и расхода пара

Соответственно коэффициент теплоотдачи определяет набор коэффициентов ПИ-регулятора в текущем режиме $K=h(\alpha)$.

Контур настройки коэффициентов фактически должен реализовать суперпозицию функций $K=h(g(N,P,G))=f(N,P,G)$ и на основе текущих измерений мощности, расхода и давления рассчитывать коэффициенты регулятора.

Для построения контура адаптации выберем наборы данных измерений, идентифицированный коэффициент теплоотдачи и рассчитанные коэффициенты. Наборы точек, для которых будут синтезироваться регуляторы, зададим двумя способами:

1) для возможного диапазона коэффициентов теплоотдачи введем равномерное разбиение; мощность, расход и давление пара выберем как средние значения при текущем коэффициенте теплоотдачи;

2) для данных оперативной идентификации выполним процедуру кластеризации.

При настройке регулятора с использованием равномерного разбиения множества коэффициентов получены наборы коэффициентов, которые в общем случае нелинейно зависят от режима, заданного коэффициентом теплоотдачи (рис. 3) и, соответственно, нелинейно зависят от выбранного вектора параметров $\langle N,P,G \rangle$.

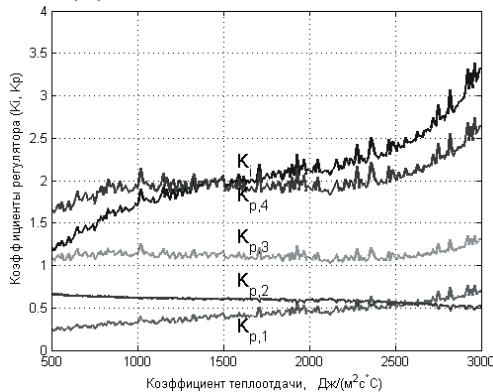


Рис.3. Зависимость коэффициентов регулятора от коэффициента теплоотдачи (равномерное разбиение для множества параметров)

Построение системы настройки коэффициентов ПИ-регулятора охлаждающего впрыска

Для интерполяции полученной нелинейной зависимости воспользуемся методами построения нечетких систем.

В качестве исходного набора данных выберем множество векторов (N,P,G,α) соответствующих различным режимам работы блока. Набор исходных данных сформирован на основе результатов измерений мощности, давления и расхода пара энергоблока СКД 300 МВт и идентификации

коэффициента теплоотдачи и соответствует примерно 105 часам измерений. Данные получены на всем диапазоне возможных режимов от 150 до 300 МВт.

К исходным данным применена процедура горной кластеризации, реализованная в среде MATLAB. Выделено 14 кластеров, для которых выполнена процедура параметрического синтеза ПИ-регулятора.

При построении системы настройки коэффициентов регулятора для каждого кластера заданы отдельные термы и сформировано одно правило вида: *ЕСЛИ $N=N^{(i)}$ И $G=G^{(i)}$ И $P=P^{(i)}$ ТО $K=K^{(i)}$* .

Выполняя процедуру нечеткого вывода по алгоритму Сугено-Такаги, получим коэффициенты стабилизирующего регулятора для отдельного момента времени [10].

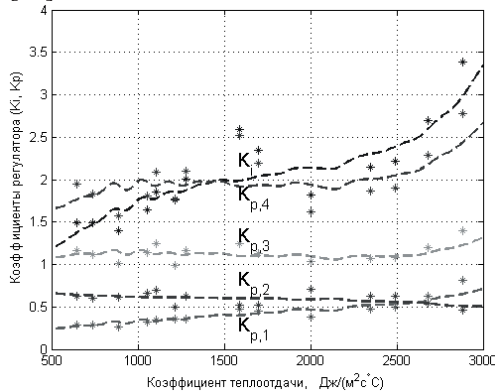


Рис.4. Зависимость коэффициентов регулятора от коэффициента теплоотдачи (кластерное разбиение множества параметров и аппроксимация нечеткой системой Сугено-Такаги)

Моделирование полученной системы управления

Для моделирования выберем данные функционирования блока при нагрузке от 170 до 300 МВт. Предложенный регулятор позволяет стабилизировать температуру на нормативном уровне (рис. 5).

На рисунке 5 приведены результаты моделирования системы с контуром настройки параметров регулятора, который представлен нечеткой системой, построенной на основе набора кластеров, выделенного из множества данных измерений энергоблока СКД 300 МВт.

Выводы. Предложена система управления охлаждающим впрыском с контуром настройки параметров ПИ-регулятора. Рассмотрена зависимость коэффициентов регулятора от заданного режима функционирования. Предложены и реализованы подходы к расчету оперативных значений коэффициентов ПИ-регулятора на основе нечеткой системы Сугено-Такаги. Исходные данные формируются на основе результатов измерений. Моделирование предложенной системы показало ее работоспособность на широком диапазоне нагрузок энергоблока.

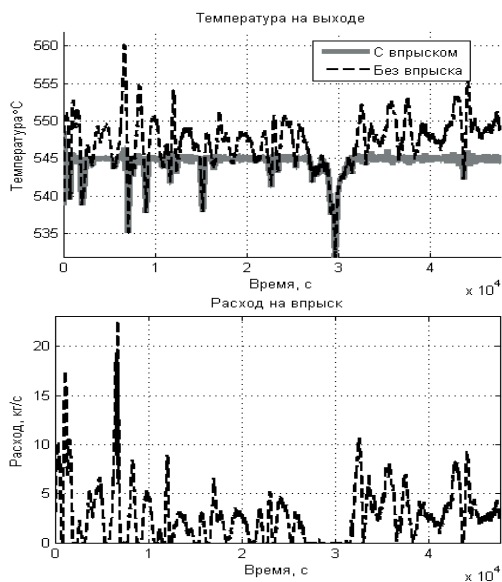


Рис.5. Изменение температуры пара и расхода на впрыск при работе энергоблока при нагрузке от 170 до 300 МВт

1. Волошенко А.В., Медведев В.В., Озерова И.П. Принципиальные схемы паровых котлов и топливоподач – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 100 с.
2. Port R.D., Herro H.M. The Nalco guide to boiler failure analysis – New York: McGraw–Hill, 1991. – 279 p.
3. Weng C.K., Ray A. Robust wide-range control of steam electric power plants // IEEE Trans. on Control Systems Technology, 1997. – Iss. 5(1). – P. 74–88.
4. Красников А.Л. Синтез ПИ-регулятора билинейной системы // Сборник тезисов XIV Международной научно-технической конференции «Моделирование, идентификация, синтез систем управления». 11-17 сентября 2011 г. – Донецк: Изд-во ИПММ НАН Украины. – С.167–168.
5. Amato F., Cosentino C., Merola A. Stabilization of Bilinear Systems via Linear State Feedback Control // IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs 56(1). – 2009 – P. 76-80.
6. Astrom K.J., Wittenmark B. Computer-controlled systems. Theory and Design. 3rd edition. – Prentice Hall, 1997. – 571 p.
7. Clement B., Duc G., Mauffrey S., Biard A. Aerospace launch vehicle control: a gain scheduling approach // Control Engineering Practice, 2005. – Vol. 13. – Iss. 3. – P. 333-347.
8. Rugh W.J., Shamma J.S. Research on gain scheduling // Automatica, 36 (2000). – P. 1401–1425.
9. Oliveira V. de, Karimi A. Robust and Gain-Scheduled PID Controller Design for Condensing Boilers by Linear Programming // Proceedings of IFAC Conference in Advances in PID Control. – Brescia, Italy, March 28-30, 2012. – 6 p.
10. Wang L.X. A Course in Fuzzy Systems and Control. – NJ: Prentice Hall, 1997. – 424 p.

Поступила 11.02.2013р.