ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР С НАБЛЮДАТЕЛЕМ СОСТОЯНИЯ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА ДЛЯ «ИСПАРИТЕЛЯ-ПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ» ПАРОВОГО КОТЛА

Рафиков Г.Ш., Ткачёва Ю.В.
Донецкий национальный технический университет,
кафедра автоматики и телекоммуникаций

Abstract. ***Rafikov G., Tkachova U. Dynamic regulator with the spectator of a state of the reduced order for « of an evaporator of a heater » of the steam boiler.*** *The work is devoted synthesis of algorithm of optimal management evaporator-over heater of esteem boiler. Received mathematical model present system. Syntheses observer of condition of low order and dynamic regulator. Width packet MATLAB received graphs of transitional processes and controlled capacity for work of a system.*

Современные паровые котлы, ТЭС и ТЕЦ являются многомерными и многосвязными объектами. Входы и выходы многомерных объектов влияют друг на друга, что приводит к взаимозависимости цепей прямой передачи сигналов от входа к выходу. Внутренняя структура многомерных объектов оказывает существенное влияние на проектирование многомерных систем управления.

Управление паровым котлом можно осуществлять путем стабилизации подачи воды, сделав подачу воды независимой от давления пара на выходе из котла. Можно поставить два регулятора температуры (пара и воды), но тогда нужно каким-либо образом согласовывать их работу между собой [1].

Наиболее рациональным является управление паровым котлом с помощью динамического регулятора. Но в этом случае возникает проблема определения переменных состояния. Для большого сложного объекта их количество может достигать нескольких десятков, на практике их невозможно или очень сложно измерить, так как процедура измерения указанных переменных требует значительных финансовых затрат, что делает экономически невыгодным применение такой системы. Восстановить столько переменных состояния технически затруднительно, но в реальных объектах (паровых котлах) очень часто несколько переменных состояния являются известными (например, выходные величины объекта), в этом случае можно ограничиться синтезом наблюдателя состояния пониженного порядка, который восстанавливает только неизмеряемые переменные.

Целью данной работы является синтез динамического регулятора с наблюдателем состояния пониженного порядка для многомерной системы «испаритель-перегреватель» парового котла с одновременным регулированием расхода воды и топлива.

Уравнение состояния и выхода для парового котла записываются следующим образом [2]:

$$\begin{bmatrix} \overset{*}{\bar{x}}_{11}(t) \\ \overset{*}{\bar{x}}_{12}(t) \\ \overset{*}{\bar{x}}_{21}(t) \\ \overset{*}{\bar{x}}_{22}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_{11}(t) \\ \bar{x}_{12}(t) \\ \bar{x}_{21}(t) \\ \bar{x}_{22}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{b}_{11} & 0 \\ \bar{b}_{12} & 0 \\ 0 & \bar{b}_{21} \\ 0 & \bar{b}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{c}_{11}^{\,T} & 0 & \bar{c}_{21}^{\,T} & 0 \\ 0 & \bar{c}_{12}^{\,T} & 0 & \bar{c}_{22}^{\,T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_{11}(t) \\ \bar{x}_{12}(t) \\ \bar{x}_{21}(t) \\ \bar{x}_{22}(t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.39*10^{-9} & -4.13*10^{-7} & -6.33*10^{-5} & -3.73*10^{-3} & -8.47*10^{-2} \end{bmatrix},$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1.81*10^{-5} & -3.5*10^{-3} & -0.1147 \end{bmatrix}, \; A_{12}[1], \; A_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0.0667 \end{bmatrix},$$

$$b_{11}=\begin{bmatrix}0\\-4.42*10^{-6}\\-9.51*10^{-7}\\-6.44*10^{-8}\\-1.40*10^{-9}\end{bmatrix},\ b_{21}=\begin{bmatrix}0\\0\\3.21*10^{-5}\end{bmatrix},\ b_{12}=\begin{bmatrix}8.71*10^{-5}\end{bmatrix},\ b_{22}=\begin{bmatrix}0\\9.21*10^{-5}\end{bmatrix},$$

$$c_{11}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix},\ c_{21}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\end{bmatrix},\ c_{12}=\begin{bmatrix}1\end{bmatrix},\ c_{22}=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}.$$

Поскольку все переменные состояния вектора $\bar{\mathrm{x}}(\mathrm{k})$ для большинства объектов управления не могут быть непосредственно измерены, их следует определять с использованием измеряемых величин.

Перейдя от непрерывной системы к дискретной, динамический объект будет описываться следующими уравнениями [3]

$$\bar{x}(k+1)=\varPhi\,\bar{x}(k)+H\,\bar{u}(k), \tag{3}$$

$$\bar{y}(k)=C\,\bar{x}(t), \tag{4}$$

где вектора и матрицы имеют следующие размерности: $\bar{x}(k)$ — вектор состояния [11×1]; $\bar{u}(k)$ — вектор управления [2×1]; $\bar{y}(k)$ — вектор выхода [2×1]; $\varPhi$ — матрица системы [11×11]; H — матрица управления [11×2]; C — матрица выхода (измерений) [2×11].

Вместо матрицы A получим $\varPhi$, а вместо B — H:

$$\varPhi=\begin{bmatrix}1 & 20 & 199 & 1272 & 4750 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 19.8 & 185.3 & 869.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 17.3 & 111.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 7.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 17.2 & 95.9 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 6.2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 11\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3\end{bmatrix},\ H=\begin{bmatrix}0.0028 & 0\\ 0.0004 & 0\\ 0 & 0\\ 0 & 0\\ 0 & 0\\ 0.0017 & 0\\ 0 & 0.0248\\ 0 & 0.0031\\ 0 & 0.0002\\ 0 & 0.0124\\ 0 & 0.0010\end{bmatrix}.$$

Вектор $\bar{x}(k)$ можно разделить на измеряемую $\bar{x}_b(k)$ и наблюдаемую $\bar{x}_a(k)$ части:

$$\bar{x}_a = \begin{bmatrix} x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{11} \end{bmatrix}^T, \ \bar{x}_b = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_{10} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

С учетом (5) уравнения (3) и (4) будут выглядеть следующим образом [4]

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_a(k+1) \\ \hline \bar{x}_b(k+1) \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \hline \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \bar{x}_a(k) \\ \hline \bar{x}_b(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_1 \\ \hline H_2 \end{bmatrix} \bar{u}(k), \quad (6)$$

$$\bar{y}(k) = \left[\begin{array}{c|c} C_1 & C_2 \end{array}\right] \begin{bmatrix} \bar{x}_a(k) \\ \hline \bar{x}_b(k) \end{bmatrix}.$$

Так как при разделении вектора переменных состояния $\bar{x}(k)$ изменен порядок их расположения, нужно соответствующим образом изменить расположение строк и столбцов в матрицах *Φ*, *H* и *C* перед их разделением. С учетом перенумерации строк и столбцов можно записать значения матриц

$$\Phi_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 19.8 & 185.3 & 869.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 17.3 & 111.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 7.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 17.2 & 95.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 6.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 \end{bmatrix}, \qquad \Phi_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_{21} = \begin{bmatrix} 20 & 199 & 1272 & 4750 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11 \end{bmatrix}, \qquad \Phi_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \qquad C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0.0004 & 0 & 0 & 0 & 0.0017 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0248 & 0.0031 & 0.0002 & 0.001 \end{bmatrix}^T, \ H_2 = \begin{bmatrix} 0.0028 & 0 \\ 0 & 0.0124 \end{bmatrix},$$

Заменим измеряемый вектор $\bar{x}_b(k)$ вектором выходных переменных $\bar{y}(k)$. В этом случае вектор состояния $\bar{V}(k)$ определяется с помощью неособого линейного преобразования [4]:

$$\bar{V}(k)=\begin{bmatrix}\bar{x}_a(k)\\ \bar{y}(k)\end{bmatrix}=T\,\bar{x}(k)=\begin{bmatrix}T_{11} & T_{12}\\ T_{21} & T_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{x}_a\\ \bar{x}_b\end{bmatrix}. \quad (8)$$

Из уравнения (7) следует, что $T_{21}=C_1$ и $T_{22}=C_2$. Поскольку $\bar{x}_a(k)$ не измеряется, $T_{11}=0$, а так как $\bar{x}_b(k)$ не зависит от $\bar{x}_a(k)$, то $T_{12}=0$. Таким образом, матрица преобразования Т имеет вид

$$T=\begin{bmatrix}I_{n-m} & 0\\ C_1 & C_2\end{bmatrix};\qquad T^{-1}=\begin{bmatrix}I_{n-m} & 0\\ -C_2^{-1}C_1 & C_2^{-1}\end{bmatrix}; \quad (9)$$

а преобразованные уравнения объекта

$$\bar{V}(k+1)=\Phi_P\,\bar{V}(k)+H_P\,\bar{u}(k), \quad (10)$$

$$\bar{y}(k)=C_P\,\bar{V}(t). \quad (11)$$

где $$\Phi_P=T\Phi T^{-1};\quad H_P=T\cdot H;\quad C_P=CT^{-1}. \quad (12)$$

Перепишем уравнение (10) с учетом блочной структуры матрицы из уравнения (6) и (7)

$$\bar{x}_a(k+1)=\Phi_{P11}\,\bar{x}_a(k)+\Phi_{P12}\,\bar{y}(k)+H_{P1}\,\bar{u}(k); \quad (13)$$

$$\bar{y}(k+1)=\Phi_{P21}\,\bar{x}_a(k)+\Phi_{P22}\,\bar{y}(k)+H_{P2}\,\bar{u}(k). \quad (14)$$

Далее на основании уравнения наблюдателя состояния пониженного порядка запишем [5]

$$\hat{\bar{x}}(k+1)=\Phi\,\hat{\bar{x}}(k)+H\,\bar{u}(k)+K_{EP}\Delta\,\bar{e}(k). \quad (15)$$

где K_{EP} — матрица наблюдателя состояния пониженного порядка.

Опуская некоторые промежуточные преобразования, можем записать уравнение ошибки наблюдателя состояния пониженного порядка

$$\bar{e}(k+1)=(\Phi_{11}-K_{EP}\Phi_{21})\,\bar{e}(k). \quad (16)$$

Характеристическое уравнение наблюдателя состояния пониженного порядка имеет вид

$$\det\left[Iz - \Phi_{P11} + K_{EP}\Phi_{P21}\right] = (z - z_1)(z - z_2)...(z - z_{n-m}) = 0. \tag{17}$$

Ввиду того, что паровой котел является многомерным объектом, к нему неприменимы методы, используемые в одномерных системах. Поэтому воспользуемся методом минимизации квадратичного критерия качества вида

$$J = \sum_{k=0}^{\infty}\left[\bar{\xi}^{T}(k)Q\bar{\xi}(k) + \bar{v}^{T}(k)R\bar{v}\right]. \tag{18}$$

Результирующие рекуррентные уравнения

$$K_{EP}^{T} = \left[R + \Phi_{21}P_k\Phi_{21}^{T}\right]\Phi_{21}P_k\Phi_{11}^{T}, \tag{19}$$

$$P_{k+1} = Q + \Phi_{11}P_k\Phi_{11}^{T} - \Phi_{11}P_k\Phi_{21}^{T}\left[(R + \Phi_{21}P_k\Phi_{21}^{T})^{-1}\right]^{T}\Phi_{21}P_k\Phi_{11}^{T}. \tag{20}$$

где Q и P — симметричные положительно определенные матрицы [9×9]; R — симметричная положительно определенная матрица [2×2]; Φ_{11} — матрица объекта управления [9×9]; Φ_{21} — матрица [2×9], которая эквивалентна матрице выхода C наблюдателя состояния полного порядка.

Решая уравнение (20) методом итераций до тех пор, пока норма матрицы $(P_{k+1} - P_k)$ будет меньше заданной погрешности, получим из (19) искомую матрицу наблюдателя состояния пониженного порядка. С помощью пакета MATLAB были получены следующие численные значения матрицы K_{EP}

$$K_{EP} = \begin{bmatrix} -6.30 & -0.74 & 0.08 & 0.001 & 0.09 & 6.34 & 0.77 & -0.06 & -0.87 \\ -48.26 & -5.51 & 0.55 & -0.05 & 3.09 & 48.26 & 5.51 & -0.55 & -8.57 \end{bmatrix}^{T}.$$

Уравнение управления на основе восстановленных переменных запишется следующим образом [4]

$$\bar{U}(k) = -K\hat{\bar{x}}(k). \tag{21}$$

где K — матрица коэффициентов обратной связи для многомерной динамической системы «испаритель-перегреватель» парового котла.

Уравнение состояния парового котла с регулятором и наблюдателем состояния пониженного порядка для независимых друг от друга регулятора и наблюдателя можно записать так

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(k+1) \\ \overset{\approx}{\bar{x}}_a(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi - HK & I_{n-p} HKI_{n-p}^T \\ 0 & \Phi_{11} - K_{EP}\Phi_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \overset{\approx}{\bar{x}}_a(k) \end{bmatrix}, \tag{22}$$

где I_{n-p} имеет размерность [9×11].

$$\bar{y}(k) = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \overset{\approx}{\bar{x}}_a(k) \end{bmatrix}. \tag{23}$$

Матрица коэффициентов обратной связи «испарителя-перегревателя» парового котла

$$K = \begin{bmatrix} -72 & 268 & 1605 & -48788 & 9844 & -200 & 156 & 78 & -33 & 15 & 7 \\ 1 & -3 & -14 & 499 & -235 & 1450 & -180 & 124 & 64 & -19 & 2 \end{bmatrix},$$

После получения общей матрицы наблюдателя и регулятора для «испарителя-перегревателя» парового котла, проведено моделирование замкнутой системы с регулятором и наблюдателем состояния пониженного порядка с использованием прикладных программ MATLAB — 6.0.

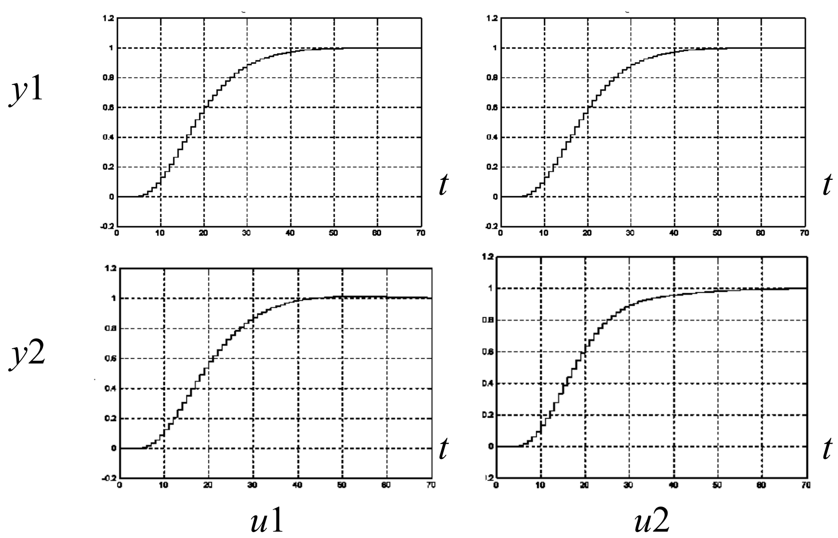

Рисунок 1 — Переходные процессы для «испарителя-перегревателя» парового котла с наблюдателем состояния пониженного порядка и регулятором

где $u1$ — управляющая переменная, расход воды;

$u2$ — управляющая переменная, расход топлива;

$y1$ — регулируемая переменная, температура пара на выходе перегревателя;

$y2$ — регулируемая переменная, давление пара в паросборителе.

Таким образом, получены результаты:

1. Разработан динамический регулятор, значительно уменьшающий число датчиков (на 9) для измерения переменных состояния, с уменьшением числа датчиков существенно повышается надежность работы системы.

2. Синтезирован алгоритм оптимального управления «испарителем-перегревателем» парового котла по квадратичному критерию качества, обеспечивающий плавность протекания переходных процессов, малые затраты на управление и грубость системы.

3. Проведена экспериментальная проверка работоспособности динамического регулятора, давшая хорошие результаты как в номинальном, так и в возмущенном режиме (при изменении параметров системы на ±20%, ±50% и ±100%).

4. Наименее чувствителен к изменению параметров испаритель, а наиболее чувствительной оказывается связь «испаритель-перегреватель».

Литература

1. Автоматическое регулирование котельных установок / Учебник для вузов Под ред. Герасимова С.Г. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950. — 424 с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 541 с.
3. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / Пер. с англ. Под ред. Я.З. Ципкина. — М.: Наука, 1985. — 296 с.
4. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. — М.: Машиностроение, 1976. — 184 с.
5. Автоматизированное проектирование систем автоматического управления / Я.Я. Алексакин, А.Э. Бржозовский, В.А. Жданов и др.; Под ред. В.В. Солодовникова. — М.: Машиностроение, 1990. — 332 с.

Сдано в редакцию: .

Рекомендовано к печати: д.т.н., проф. Спорыхин В.Я.