

В.Н. Анисимов

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный Университет)

РАСЧЕТ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОТСАДОЧНОЙ МАШИНОЙ

Подлежащий обогащению рядовой уголь, представлен смесью угольных и породных частиц, которые отличаются по плотности и крупности. В большинстве случаев для обогащения угля применяют технологический процесс отсадки. На основе различия плотностей угля и породы, осуществляется разделение – обогащение рядового угля на легкую (угольную) и тяжелую (породную) части, которые образуются на решетке отсадочной машины в результате периодического действия восходящих и нисходящих потоков разделительной среды, обусловленной работой воздушных пульсаторов. Процесс отсадки является сложным и многофакторным, поэтому управлять им вручную практически невозможно. Разработана и проверена в промышленных условиях система управления процессом отсадки на базе компьютерных технологий.

В системе для управления процессом отсадки используется фракционная характеристика, обогащаемого угля, которую получают с периодичностью 3 месяца путем отбора контрольных проб.

Фракционные характеристики определяются по общепринятой методике и формируются в виде таблицы или графика. Результаты фракционного анализа являются основой для расчета системой управления конкретных значений параметров процесса обогащения.

В частности, по результатам анализа определяют количественные показатели – выход концентрата и породы, а в случае необходимости промпродукта и значения плотности границ разделительной среды, при которой данные величины качественных и количественных показателей будут получены, количество транспортной и подрешетной воды и другие технологические параметры.

Функцией цели системы управления является выработка управляющих воздействий для исключения попадания легкой (угольной) фракции в породу – отходы.

В реальных условиях, при заданной плотности разделения, учитывая то, что объект многомерный, обладающий собственными динамическими характеристиками, и то, что отработка управляющих воздействий осуществляется исполнительными механизмами, которые также имеют инерционность, в систему управления введена обратная связь по контролю зольности породы. Выбор данного параметра обусловлен необходимостью исключения потерь горючей массы в процессе обогащения. В принципе, в зависимости от требований к продуктам обратная связь может осуществляться по качеству концентрата (зольно-

сти). Для этого рассчитаны параметры инерционности, управляемости, наблюдаемости, а также устойчивости объекта управления при работе с квазиоптимальным регулятором.

С учетом погрешности существующих золомеров в 1-2% необходима коррекция зольности породы согласно выражению $A_{3n}^d = A_{3n}^d - 0,0066A_{3n}^d$. Кроме того, необходимо ввести допустимую зону изменения зольности породы в пределах $\pm 0,5\%$. Таким образом, не допускается попадание породы в концентрат. Для этого следует представить отсадочную машину по каналу плотность разделения – зольность породы в виде апериодического звена с запаздыванием.

Структурная схема программной замкнутой АСУ в этом представлении изображена на рис. 1.



Рис. 1. Упрощенная структурная схема объекта управления с квазиоптимальным регулятором в обратной связи

Для практической реализации квазиоптимального регулятора определена динамическая характеристика объекта управления.

В результате эксперимента была получена (при единичном входном воздействии) кривая разгона отсадочной машины типа ОМ-24 по каналу – частота пульсаций ω , зольность породы A_n^d , (рис. 2). Эксперимент проведен на ЦОФ “Павлоградская” следующим образом. У подготовленной к работе отсадочной машины скачком изменялась частота пульсаций с $\omega_0 = 0$ 1/с до $\omega_1 = 1$ 1/с (внесено возмущение в виде ступенчатого воздействия на объект). При $\omega = const$ и зафиксированных (по возможности) на время эксперимента других возмущающих воздействий на объект, в основном, это качественно – количественные характеристики сырья (угля, поступающего на обогащение отсадкой), непрерывно измерялась величина зольности породы на выходе отсадочной машины, количество транспортной и подрешетной воды, высота постели.

Передаточная функция отсадочной машины типа ОМ-24 в соответствии с объектом регулирования и кривой разгона (рис. 2), после преобразований примет вид:

$$W_0(p) = \frac{K_0}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} e^{-t_0 \cdot p}, \quad (1)$$

Постоянные времени, общее время запаздывания, и коэффициент передачи объекта определены по кривой разгона $T_1 = 13,5\text{с}$; $T_2 = 6,75\text{с}$; $T_3 = 4,5\text{с}$; $\tau_0 = 10\text{с}$; $K_0 = 35\%$.

При разложении трансцендентной функции в виде отношения степенных рядов

$$e^{-t_0 p} = \frac{1 - \frac{t_0}{2} p}{1 + \frac{t_0}{2} p} \quad (2)$$

и после подстановки получим

$$W_O(p) = k_0 \cdot \frac{1 - \frac{t_0}{2} p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) \left(1 + \frac{t_0}{2} p\right)} \quad (3)$$

Представим выражение (3) в виде линейного дифференциального уравнения

$$\frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{k_0 \cdot (2 - t_0 p)}{(2 + t_0 p)(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} \quad (4)$$

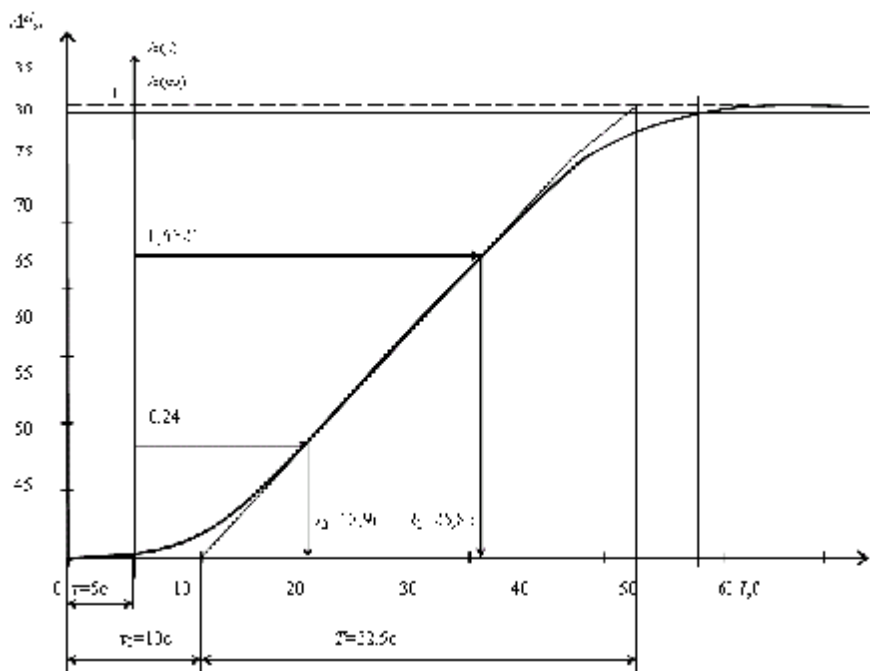


Рис. 2. Кривая разгона отсадочной машины типа ОМ-24 по каналу частота пульсаций ω , зольность породы A_n^d

После преобразований запишем

$$\begin{aligned} 4100,625Y^{(4)} + 2642,625Y^{(3)} + 612Y^{(2)} + 59,5Y^{(1)} + 2Y = \\ = -350U^{(1)} + 70U \end{aligned} \quad (5)$$

Приведение (5) относительно коэффициента при высшей производной формирует окончательное выражение для отсадочной машины типа ОМ-24 в следующем виде:

$$\begin{aligned} Y^{(4)} + 6,4444 \cdot 10^{-1}Y^{(3)} + 1,149245 \cdot 10^{-1}Y^{(2)} + 1,451 \cdot 10^{-2}Y^{(1)} + \\ + 4,877 \cdot 10^{-4}Y = -8,535 \cdot 10^{-2}U^{(1)} + 1,707 \cdot 10^{-2}U. \end{aligned} \quad (6)$$

В общем виде уравнение (6) можно записать:

$$\begin{aligned} Y^{(4)} + a_4Y^{(3)} + a_3Y^{(2)} + a_2Y^{(1)} + a_1Y = -b_1U^{(1)} + b_0U \\ Y(0) = Y_0; \quad Y^{(1)}(0) = Y_1; \quad Y^{(2)}(0) = Y_2; \quad Y^{(3)}(0) = Y_3; \end{aligned} \quad (7)$$

где:

$$\begin{aligned} a_4 = 6,4444 \cdot 10^{-1}, a_3 = 1,149245 \cdot 10^{-1}, a_2 = 1,451 \cdot 10^{-2}, \\ a_1 = 4,877 \cdot 10^{-4}, b_1 = 8,535 \cdot 10^{-2}, b_0 = 1,707 \cdot 10^{-2}. \end{aligned}$$

В соответствии с функцией цели необходимо сформировать такое уравнение, которое обеспечивало бы минимизацию критерия оптимальности:

$$J = \int_0^{\infty} (qY^2 + U^2)dt; \quad \rightarrow \min, \quad q > 0, \quad (8)$$

где Y – разница между полученной зольностью и заданной; U – затраты при работе; q – коэффициент важности, исходя из технологических соображений принимается $q=5$. Представление уравнения (7) в форме системы уравнений в переменных состояния определит следующее выражение:

$$\begin{cases} X_1^{(1)} = X_2, \\ X_2^{(1)} = X_3, \\ X_3^{(1)} = X_4, \\ X_4^{(1)} = -a_1X_1 - a_2X_2 - a_3X_3 - a_4X_4 + U, \\ Y = b_0X_1 - b_1X_2. \end{cases} \quad (9)$$

Система (9) в общем виде описывается как

$$\begin{cases} \dot{x}^{(1)} = Ax + Bu; \\ Y = Cx; \end{cases}$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad C = [b_0 \quad b_1 \quad b_2]; \quad X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix};$$

$$G = [BMB];$$

$$H = [C^T M^T C^T].$$

Проверка условия управляемости и наблюдаемости для рассматриваемого объекта показывает, что отсадочная машина типа ОМ-24 по каналу – частота пульсаций ω зольность породы A_n^d является полностью управляемой и наблюдаемой, поскольку ранги матриц G и H равны двум.

С учетом (9) функционал (8) будет иметь вид:

$$J = \int_0^{\infty} (aX_1^2 + bX_2^2 - gX_1X_2 + U^2) dt, \quad (10)$$

где $a = qb_0^2$; $b = q(b_1^2)$; $g = 2qb_0b_1$.

Функциональные уравнения Р.Беллмана, в этом случае следующие:

$$\left\{ \begin{array}{l} aX_1^2 + bX_2^2 - gX_1X_2 + U^2 + X_2 \frac{\partial S}{\partial X_1} + \\ + X_3 \frac{\partial S}{\partial X_2} + X_4 \frac{\partial S}{\partial X_3} + \\ + (u - a_1X_1 - a_2X_2 - a_3X_3 - a_4X_4) \frac{\partial S}{\partial X_4} = 0, \\ 2U + \frac{\partial S}{\partial X_4} = 0. \end{array} \right. \quad (11)$$

Из второго уравнения системы (11) получим

$$U = -0,5 \frac{\partial S}{\partial X_4}, \quad (12)$$

а из первого, после подстановки в него выражения (12) получается

$$\begin{aligned} & aX_1^2 + bX_2^2 - gX_1X_2 + X_2 \frac{\partial S}{\partial X_1} + X_3 \frac{\partial S}{\partial X_2} + X_4 \frac{\partial S}{\partial X_3} - \\ & -(a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4) \frac{\partial S}{\partial X_4} = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial S}{\partial X_4} \right)^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Для нахождения закона управления в виде $U = U(X_1, X_2, X_3, X_4)$, необходимо определить функцию Ляпунова через функцию S , которую можно записать как:

$$\begin{aligned} S = & A_1X_1^2 + A_2X_2^2 + A_3X_3^2 + A_4X_4^2 + A_5X_1X_2 + \\ & + A_6X_1X_3 + A_7X_1X_4 + A_8X_2X_3 + A_9X_2X_4 + A_{10}X_3X_4 \end{aligned} \quad (14)$$

тогда коэффициенты $A_1, A_2, A_3, \dots, A_{10}$ в результате вычислений получают значения:

$$\begin{aligned} A_1 = & 5,159 \cdot 10^{-3}; A_2 = 2,7 \cdot 10^{-2}; A_3 = 2,99 \cdot 10^{-1}; A_4 = 3,52 \cdot 10^{-1}; A_5 = -3,4 \cdot 10^{-2}; \\ A_6 = & -5,4 \cdot 10^{-2}; A_7 = -7,7 \cdot 10^{-2}; A_8 = 1,69 \cdot 10^{-1}; A_9 = 8,2 \cdot 10^{-2}; A_{10} = 5,77 \cdot 10^{-1}. \end{aligned}$$

После преобразований управление

$$U = -A_4X_4 - 0,5A_7X_1 - 0,5A_9X_2 - 0,5A_{10}X_3, \quad (15)$$

а выражение (9) с учетом уравнения (15) будет:

$$\begin{cases} X_1^{(1)} = X_2, \\ X_2^{(1)} = X_3, \\ X_3^{(1)} = X_4, \\ X_4^{(1)} = -(a_1 + 0,5A_7)X_1 - (a_2 + 0,5A_9)X_2 \\ -(a_3 + 0,5A_{10})X_3 - (a_4 + A_4)X_4. \end{cases} \quad (16)$$

В выражении (16) необходимо перейти от переменных состояния X_1 и X_2 к переменной Y . Продифференцировав уравнение выхода (9), с учетом (16) находят X_1, X_2, X_3, X_4 .

$$\begin{cases} Y = b_0X_1 - b_1X_2, \\ Y^{(1)} = b_0X_2 - b_1X_3, \\ Y^{(2)} = b_0X_3 - b_1X_4, \\ Y^{(3)} = b_0X_4 + b_1(a_1 + 0,5A_7)X_1 + b_1(a_2 + \\ + 0,5A_9)X_2 + b_1(a_3 + 0,5A_{10})X_3 + b_1(a_4 + A_4)X_4. \end{cases} \quad (17)$$

В результате вычислений значения x_1, x_2, x_3, x_4 , следующие:

$$U = 209,8231Y + 743,599Y^{(1)} + 1310,77Y^{(2)} + 1092,108Y^{(3)}. \quad (18)$$

Числовые коэффициенты в (18) будут:

$$l_0 = 209,8231, l_1 = 743,599, l_2 = 1310,77, l_3 = 1092,108.$$

Структурная схема квазиоптимального регулятора представлена на (рис.3).

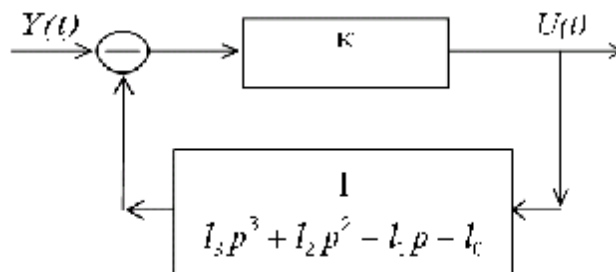


Рис. 3. Структурная схема квазиоптимального регулятора

Передаточная функция синтезированного квазиоптимального регулятора с учетом критерия оптимальности для ОМ-24 имеет вид:

$$W_p = \frac{l_3 p^3 + l_2 p^2 + l_1 p + l_0}{1 + h(l_3 p^3 + l_2 p^2 + l_1 p + l_0)}, \quad (19)$$

где $h = \frac{1}{k}$ и при $h \rightarrow 0, k \rightarrow \infty$ преобразуется в передаточную функцию оптимального регулятора.

Отсюда квазиоптимальная система примет вид (рис. 4).

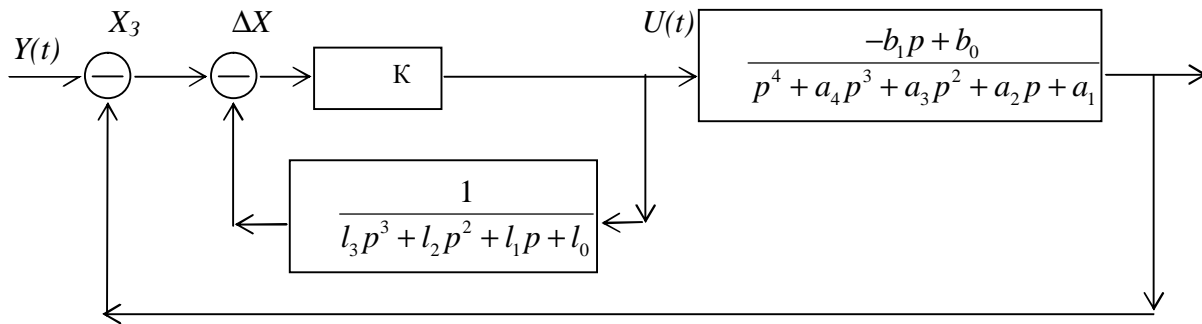


Рис. 4. Система регулирования с квазиоптимальным регулятором

Передаточная функция замкнутой системы регулирования отсадочной машины типа ОМ-24

$$W_3 = \frac{\frac{-b_1 p + b_0}{p^4 + a_4 p^3 + a_3 p^2 + a_2 p + a_1}}{1 + h \left(\frac{-b_1 p + b_0}{p^4 + a_4 p^3 + a_3 p^2 + a_2 p + a_1} \right) \left(\frac{l_3 p^3 + l_2 p^2 + l_1 p + l_0}{1 + h(l_3 p^3 + l_2 p^2 + l_1 p + l_0)} \right)} \quad (20)$$

Устойчивость замкнутой системы регулирования определяется на основании характеристического уравнения системы регулирования:

$$\begin{aligned} & hl_3 p^7 + h(l_2 + a_4 l_3) p^6 + h(l_1 + a_4 l_2 + a_3 l_3) p^5 + \\ & + (h(l_0 + a_4 l_1 + a_3 l_2 + a_2 l_3) + 1 - b_1 l_3) p^4 + \\ & + (h(a_4 l_0 + a_3 l_1 + a_2 l_2 + a_1 l_3) + a_4 - b_1 l_2 + b_0 l_3) p^3 + \\ & + (h(a_3 l_0 + a_2 l_1 + a_1 l_2) + a_3 - b_1 l_1 + b_0 l_2) p^2 + \\ & + (h(a_2 l_0 + a_1 l_1) + a_2 - b_1 l_0 + b_0 l_1) p + h a_1 l_0 + a_1 + b_0 l_0 = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Поскольку все вещественные части корней характеристического уравнения (21) отрицательны, значит система регулирования - устойчива.

Таким образом синтезированная квазиоптимальная система, при достижении минимума критерия оптимальности, для технологического процесса отсадки в отсадочной машине типа ОМ-24 позволяет повысить выход концентрата на 3 ... 4 % и снизить его зольность на 2 ... 3 %. Экономический эффект использования системы в управлении технологическим процессом составляет порядка 524100 грн. в год при часовой производительности 300 т/ч.