

## Автоматизація та управління процесами збагачення

1. **Clausing G.** Automatisierter Schlamabzug aus einen Eindicker // Bergakademie. – 1970. – 22. – № 10. – С. 588–591.
2. **Шпилевой Л.В.** Особенности автоматического регулирования разгрузки сгустителя // Автоматизация металлургических процессов: Сб. науч. тр. / ВНИКИ "Цветметавтоматика". – М., 1981. – С. 59–62.
3. **Головков Б.Ю., Колпиков Г.Г., Рейбман Л.А.** Автоматизация калийных обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1983. – 200 с.
4. **Назаров В.П., Лыгач В.Н., Макаров А.М., Петров И.П.** Контроль нагрузки на ферму сгустителя // Промышленность горно-химического сырья: Сб. науч. работ. – М., 1973. – Вып. 4. – С. 64–65.
5. **Андреев Е.Е., Кузнецов П.В.** О замере нагрузки машины по мощности, потребляемой ее электродвигателем // Обогащение руд. – 1999. – № 4. – С. 41–43.
6. **Лещенко Л.В.** Гравитационные методы обогащения металлов. – Л.: Гостоптехиздат, 1940. – 342 с.
7. **Кизевальтер Б.В.** Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. – М.: Недра, 1979. – 295 с.
8. **Касаткин А. Г.** Основные процессы и аппараты химической промышленности. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
9. **Штербачек З., Тауск П.** Перемешивание в химической промышленности. – Л.: Ленинградское отделение Госхимиздата, 1963. – 416 с.
10. **Баттаглия А.** Обезвоживание продуктов обогащения и циркуляция моечных вод. – М.: Недра, 1967. – 100 с.
11. **Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы.** Под ред. О.С. Богданова, Ю.Ф. Ненарокова, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 358 с.
12. Пат. 65883 А Україна, МКІ В01D21/00. Спосіб автоматичного керування роботою радіального згущувача / Л. В. Шпильовий (Україна). – № 2003065709; Заяв. 20.06.03; Опубл. 15.04.04; Бюл. № 4. – 2 с.

© Білецький В.С., Шпильовий Л.В., 2005

*Надійшла до редколегії 02.11.2005 р.  
Рекомендовано до публікації*

УДК 681.5:622.765

**Д.А. ЗУБОВ**, канд. техн. наук  
(Украина, Луганск, Восточноукраинский национальный университет им.В.Даля)

### ПАССИФИКАЦИЯ И СИНТЕЗ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОДНИМ КЛАССОМ SISO-ОБЪЕКТОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГЕБРЫ ЛИ

*Введение*

Тензорно-групповой подход к анализу и разработке систем

107

Збагачення корисних копалин, 2005. – Вип. 24(65)

## Автоматизация та управління процесами збагачення

автоматического управления (САУ) в настоящее время предоставляет математический аппарат эффективного синтеза регуляторов нелинейных объектов [1, 2]. Важное место при этом занимают устойчивые и робастные пассивированные нелинейные аффинные системы [1], которые позволяют компенсировать только негативные нелинейности ("неполезные" нелинейности, определяющие движение от требуемого многообразия) в отличие от полной компенсации при классическом синтезе регуляторов на основе точной линеаризации. В данной статье рассматривается пассивация и синтез алгоритма автоматического управления нелинейным одноканальным (SISO) объектом управления (ОУ), представляющим собой апериодическое звено первого порядка с запаздыванием и коэффициентом усиления в виде полинома второго порядка (рис. 1, где  $y$  – выходная координата ОУ;  $y_1$  – выходная координата линейной динамической части ОУ;  $u$  – управляющее воздействие;  $T$  – постоянная времени, с;  $\tau$  – запаздывание, с;  $p$  – оператор Лапласа). Модель данного ОУ при аппроксимации запаздывания рядом Пада первого порядка [3] имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{u}{a_0} - \frac{a_1}{a_0} x_2 - \frac{a_2}{a_0} x_1; \\ y_1 = b_0 x_2 + b_1 x_1; \\ y = d_1 x_2 + d_2 x_1 + d_3 x_2^2 + d_4 x_1 x_2 + d_5 x_1^2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_1, x_2$  – переменные пространства состояний ОУ;  $a_0=0,5\tau T$ ;  $a_1=0,5\tau+T$ ;  $a_2=1$ ;  $b_0=-0,5\tau$ ;  $b_1=1$ ;  $d_1=c_1 b_0$ ;  $d_2=c_1 b_1$ ;  $d_3=c_2 b^2_0$ ;  $d_4=2c_2 b_0 b_1$ ;  $d_5=c_2 b^2_1$ ;  $c_1, c_2$  – коэффициенты полинома, аппроксимирующего нелинейный коэффициент усиления.

Данным классом ОУ (1) аппроксимируются с достаточной для практики точностью SISO-объекты углеобогажительного производства [4,5]. Структура (1) моделей ОУ углеобогащения обусловлена тем, что в них происходит разделение рядового угля на концентрат и отходы (имитационные динамические модели на основе уравнений материального баланса представляются апериодическими звеньями первого порядка [5]), транспортирование материала по конвейерам и трубопроводам (транспортное запаздывание), статические характеристики являются нелинейными [4] (данная нотация учитывается в нелинейном коэффициенте усиления).

## Автоматизація та управління процесами збагачення

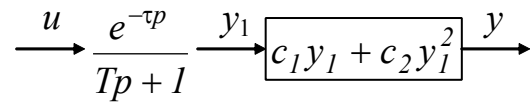


Рис. 1. Структура ОУ

### 1. Пасифікація і синтез регулятора ОУ (1)

Векторное поле аффинного пространства состояний ОУ (1) имеет вид:

$$X(x) = \begin{pmatrix} x_2 & -\frac{a_2}{a_0} x_1 - \frac{a_1}{a_0} x_2 \end{pmatrix}^T.$$

Управляемое векторное поле ОУ (1) следующие:

$$Y(x) = \begin{pmatrix} 0 & 1/a_0 \end{pmatrix}^T.$$

Желаемая поверхность скольжения  $N$  определяется как ( $M$  – гладкое многообразие):

$$N = \{x \in M: h(x) = d_1 x_2 + d_2 x_1 + d_3 x_2^2 + d_4 x_1 x_2 + d_5 x_1^2 = 0\},$$

а производная Ли функции  $h(x)$  (производная функции  $h(x)$  вдоль векторного поля  $Y(x)$ )

$$\begin{aligned} L_Y h &= \sum_{i=1}^2 y_{1,i}(x) \frac{\partial}{\partial x_i} h(x) = \frac{\partial (d_1 x_2 + d_2 x_1 + d_3 x_2^2 + d_4 x_1 x_2 + d_5 x_1^2)}{\partial x_1} + \\ &+ \frac{\partial (d_1 x_2 + d_2 x_1 + d_3 x_2^2 + d_4 x_1 x_2 + d_5 x_1^2)}{\partial x_2} = (d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1) / a_0. \end{aligned}$$

Предположим, что  $L_Y h \neq 0 \forall x \in M$ , тогда для определения управления можно найти следующие матрицы:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \begin{pmatrix} d_2 + d_4 x_2 + 2d_5 x_1 \\ d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1 \end{pmatrix};$$

$$S(x) = \frac{1}{2L_y h} (XY^T + YX^T)(x) = \frac{a_0}{2(d_1 + 2d_3x_2 + d_4x_1)} \left( \begin{pmatrix} 0 & \frac{x_2}{a_0} \\ 0 & -\frac{a_2}{a_0}x_1 - \frac{a_1}{a_0}x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{x_2}{a_0} & -\frac{a_2}{a_0}x_1 - \frac{a_1}{a_0}x_2 \end{pmatrix} \right) = \frac{1}{2(d_1 + 2d_3x_2 + d_4x_1)} \begin{pmatrix} 0 & x_2 \\ x_2 & -2\left(\frac{a_2}{a_0}x_1 + \frac{a_1}{a_0}x_2\right) \end{pmatrix}.$$

Представим  $S(x)$  в виде суммы:

$$S(x) = S(x) + S_p(x) = \frac{1}{2(d_1 + 2d_3x_2 + d_4x_1)} \begin{pmatrix} 0 & x_2 \\ x_2 & -2\left(\frac{a_2}{a_0}x_1 + \frac{a_1}{a_0}x_2\right) \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = S_n(x),$$

где  $S_n(x)$  – неположительно определенная матрица;  $S_p(x)$  – неотрицательно определенная матрица.

Найдем матрицы  $S_n^\Delta(x)$  и  $S_p^\Delta(x)$ , при которых

$$S_n(x) + S_n^\Delta(x) < 0 \quad \text{и} \quad S_p(x) + S_p^\Delta(x) > 0.$$

Пусть

$$S_n^\Delta(x) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & a \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$S_n(x) + S_n^\Delta(x) = \frac{1}{2(d_1 + 2d_3x_2 + d_4x_1)} \begin{pmatrix} -1 & x_2 \\ x_2 & a - 2\left(\frac{a_2}{a_0}x_1 + \frac{a_1}{a_0}x_2\right) \end{pmatrix} < 0$$

будет справедливо в области

## Автоматизація та управління процесами збагачення

$$(-1) \left( a - 2 \frac{\frac{a_2}{a_0} x_1 + \frac{a_1}{a_0} x_2}{d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1} \right) - \frac{x_2^2}{(d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1)^2} < 0$$

или

$$a > 2 \frac{\frac{a_2}{a_0} x_1 + \frac{a_1}{a_0} x_2}{d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1} - \frac{x_2^2}{(d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1)^2}. \quad (2)$$

Если взять  $a \gg 0$ , то условие (2) в необходимой области всегда выполняется.

Пусть

$$S_p^\Delta(x) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда неравенство  $S_p(x) + S_p^\Delta(x) > 0$  истинно при  $\forall x$ .

Найдем управляющее воздействие  $u_p(x)$  для случая  $h(x) > 0$ :

$$\begin{aligned} u_p(x) &= \frac{1}{L_y h} \left( \frac{\partial h^T}{\partial x} S_n^\Delta(x) \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial h^T}{\partial x} S_p(x) \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{1}{L_y h} \frac{\partial h^T}{\partial x} S_n^\Delta(x) \frac{\partial h}{\partial x} = \\ &= \frac{a_0}{2(d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1)} \begin{pmatrix} d_2 + d_4 x_2 + 2d_5 x_1 \\ d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_2 + d_4 x_2 + 2d_5 x_1 \\ d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1 \end{pmatrix} = \\ &= \frac{a_0}{2} \left( a(d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1) - \frac{(d_2 + d_4 x_2 + 2d_5 x_1)^2}{d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1} \right). \end{aligned}$$

Найдем управляющее воздействие  $u_n(x)$  для случая  $h(x) < 0$ :

$$\begin{aligned} u_n(x) &= -\frac{1}{L_y h} \left( \frac{\partial h^T}{\partial x} S_n^\Delta(x) \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial h^T}{\partial x} S_p(x) \frac{\partial h}{\partial x} \right) = -\frac{a_0}{2(d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1)} \times \\ &\times \left( \begin{pmatrix} d_2 + d_4 x_2 + 2d_5 x_1 \\ d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_2 + d_4 x_2 + 2d_5 x_1 \\ d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} d_2 + d_4 x_2 + 2d_5 x_1 \\ d_1 + 2d_3 x_2 + d_4 x_1 \end{pmatrix}^T \times \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \left( \begin{array}{cc} 0 & \frac{x_2}{d_1 + 2d_3x_2 + d_4x_1} \\ \frac{x_2}{d_1 + 2d_3x_2 + d_4x_1} & -2 \left( \frac{a_2}{a_0} x_1 + \frac{a_1}{a_0} x_2 \right) \end{array} \right) \left( \begin{array}{c} d_2 + d_4x_2 + 2d_5x_1 \\ d_1 + 2d_3x_2 + d_4x_1 \end{array} \right) = \\
 & = -\frac{a_0}{2} \left( \frac{(d_2 + d_4x_2 + 2d_5x_1)^2}{d_1 + 2d_3x_2 + d_4x_1} + (d_1 + 2d_3x_2 + d_4x_1) \left( 1 - 2x_2(d_2 + d_4x_2 + 2d_5x_1) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + 2 \left( \frac{a_2}{a_0} x_1 + \frac{a_1}{a_0} x_2 \right) (d_1 + 2d_3x_2 + d_4x_1) \right) \right). \tag{3}
 \end{aligned}$$

Необходимо отметить, что формула (3) отличается только знаком от аналогичной зависимости в работе [1] (исправление автора – анализ значений управляющих воздействий в нижеприведенном исследовании процесса флотации показал, что именно знак "-" в (3) позволяет получить требуемые качественные характеристики выходной координаты).

*2. Исследование пассивированного алгоритма автоматического управления процессом флотации по каналам удельное дозирование реагента пенообразователя – зольность флотоконцентрата и флотоотходов как SISO-объектами с использованием алгебры Ли*

Параметры модели (1) для процесса флотации угля [4] для канала управления удельное дозирование реагента пенообразователя – зольность флотоконцентрата имеют следующие значения:  $T=200$  с;  $\tau=240$  с;  $c_1=0,4007143$ ;  $c_2=-0,01069728$ . Значительное транспортное запаздывание  $\tau > T$  обусловлено тем, что измерение зольности флотоконцентрата доступно только после его фильтрации (например, на вакуум-фильтрах [4, 5]).

Параметры модели (1) для процесса флотации угля [4] для канала управления удельное дозирование реагента пенообразователя – зольность флотоотходов имеют следующие значения:  $T=300$  с;  $\tau=15$  с;  $c_1=1,9565595$ ;  $c_2=-0,0960941$ . Незначительное транспортное запаздывание  $\tau=0,05T$  обусловлено тем, что измерение зольности флотоотходов доступно прямо в кармане флотомашин (например, устройством УЗОФ, разработанным в НИПИУглевотоматизации, г.Луганск).

Входные и выходные переменные рассматриваются как отклонения от следующих значений: для пенообразователя –  $8,4$  г/м<sup>3</sup>, для зольности флотоконцентрата –  $7\%$  и флотоотходов –  $73,6\%$ . Допускаем, что максимально возможное отклонение управляющего воздействия составляет  $\pm 8,4$  г/м<sup>3</sup>, т.е.  $|u_p|, |u_n| \leq 8,4$  г/м<sup>3</sup>. Константе  $a$  из неравенства (2) присваиваем значение  $10000$ .

## Автоматизация та управління процесами збагачення

Для переходу від неперервної моделі ОУ (1) к конечно-разностному аналогу с периодом квантования по времени 1 с воспользуемся известными формулами Эйлера:

$$\begin{cases} x_1[n] = x_2[n-1] + x_1[n-1], \\ x_2[n] = \frac{(u[n-1] - a_1 x_2[n-1] - a_2 x_1[n-1])}{a_0} + x_2[n-1], \\ y[n] = d_1 x_2[n] + d_2 x_1[n] + d_3 x_2^2[n] + d_4 x_1[n] x_2[n] + d_5 x_1^2[n], \end{cases} \quad (4)$$

где  $n$  – дискретный момент времени.

В начальный момент времени переменные пространства состояний и управляющее воздействие имели следующие значения:  $x_1[-1] = -8,4$ ;  $x_2[-1] = 0$ ;  $x_1[0] = -8,4$ ;  $x_2[0] = 0$ ;  $u[0] = -8,4$ .

На рис. 2 приведены фрагменты временных рядов изменения управляющего воздействия – удельного дозирования реагента пенообразователя  $u[n]$  и выходной координаты – зольности флотоконцентрата  $y[n]$ , а на рис. 3 – то же самое, только зольности флотоотходов.

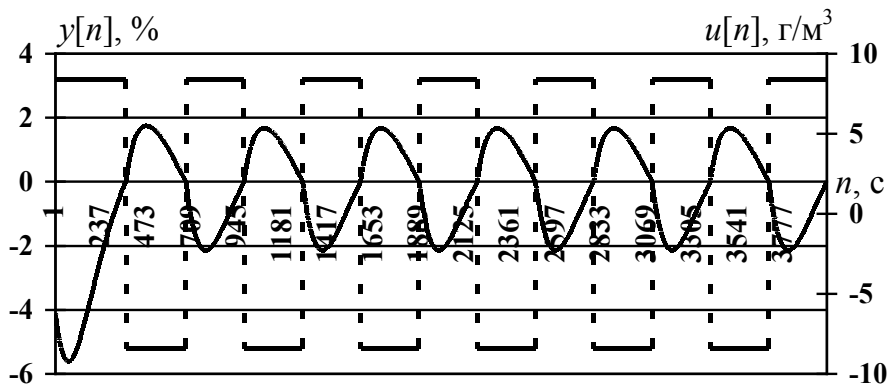


Рис. 2. Фрагменты временных рядов изменения управляющего воздействия – удельного дозирования реагента пенообразователя  $u[n]$  (пунктирная линия) и выходной координаты – зольности флотоконцентрата  $y[n]$  (сплошная линия)

## Автоматизація та управління процесами збагачення

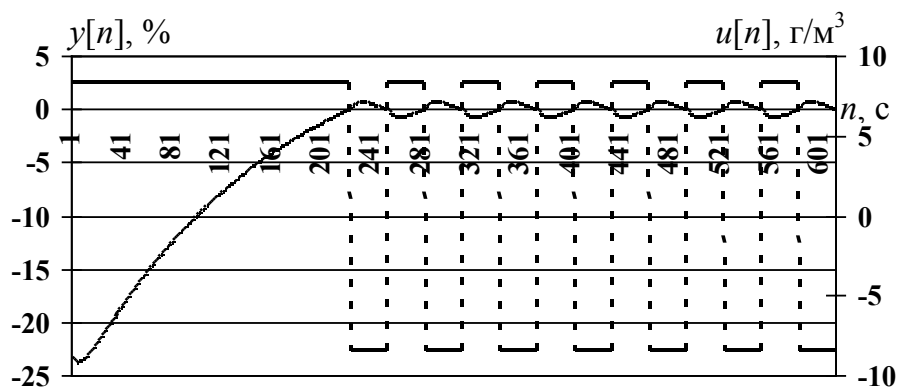


Рис. 3. Фрагменти часових рядів зміни управляючого впливу – удельного дозирования реагента пенообразователя  $u[n]$  (пунктирна лінія) и вихідної координати – зольності флотоотходів  $y[n]$  (сплошна лінія)

як видно из анализа приведенных зависимостей, синтезированный пассивированный алгоритм автоматического управления процессом флотации действует по принципу однопозиционного реле [6]. Релейное регулирование ОУ с запаздыванием представляет собой один из наиболее простых способов автоматического управления [6], при использовании которого с превышением соотношения  $\tau/T$  определенного значения показатели функционирования САУ выходят за рамки технологического регламента (например, из рис. 2 видно, что половина амплитуды колебаний зольности флотоконцентрата больше 1%). Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Синтезированный пассивированный алгоритм автоматического управления процессом флотации (по каналам удельное дозирование реагента пенообразователя – зольность флотоконцентрата и флотоотходов) с использованием алгебры Ли действует по принципу однопозиционного реле.

2. При управлении ОУ (1) с незначительным запаздыванием  $\tau=0,05T$  (для канала управления удельное дозирование реагента пенообразователя – зольность флотоотходов) значение выходной координаты находится в пределах технологического регламента (половина амплитуды колебаний зольности флотоотходов меньше 1%).

3. При управлении ОУ (1) с большим запаздыванием  $\tau=1,2T$  (для канала управления удельное дозирование реагента пенообразователя – зольность флотоконцентрата) значение выходной координаты не соответствует технологическому регламенту (половина амплитуды колебаний зольности флотоконцентрата больше 1%).

Перспективой дальнейших исследований представляется нахождение однопараметрической группы преобразований ОУ (1) с дальнейшей



## Автоматизация та управління процесами збагачення

аппроксимацией ее присоединенного представления и соответствующим синтезом САУ.

### Список литературы

1. Краснощеченко В.И., Крищенко А.П. Нелинейные системы: геометрические методы анализа и синтеза. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 520 с.
2. Олвер П. Приложения групп Ли к дифференциальным уравнениям: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 639 с.
3. Жовинский Н.В. Схемы запоминания напряжений и блоки запаздывания. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 80 с.
4. Власов К.П. Основы автоматического управления технологическими процессами обогащения угля. – М.: Недра, 1985. – 188 с.
5. Автоматизация производства на углеобогатительных фабриках / Л.Г.Мелькумов, В.А.Ульшин, М.А.Бастунский и др. – М.: Недра, 1983. – 295 с.
6. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием: Пер. с польского. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.

© Зубов Д.А., 2005

*Надійшла до редколегії 09.11.2005 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. В.О. Ульшиним*

УДК 622.7

**А.И. ЛАЗОРИН**, канд. тех. наук,

**И.А. ЗУБ, Н.Н. ОДНОВОЛ**

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет),

**К.К. САВЧЕНКО**

(Украина, Днепропетровск, Торгово-промышленная группа "Стандарт")

### СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВА КОНЦЕНТРАТА ОТСАДОЧНОЙ МАШИНЫ С ДОБАВОЧНЫМ ИНФОРМАЦИОННЫМ КОНТУРОМ

Известно, что основная цель управления отсадочной машины (ОМ) – получение угольного концентрата заданного качества. Предложено несколько способов автоматического управления ОМ по зольности концентрата, один из которых, основан на измерении зольности обезвоженного концентрата и ее поддержании на требуемом уровне путем изменения плотности разделения в промпродуктовом отделении ОМ [1]. Синтез автоматической системы стабилизации зольности концентрата, реализующей предложенный способ, осуществлен в [2]. Данная система имеет в своем составе датчик измерения зольности, к выходу которого подключен командный регулятор, выход которого, в свою очередь,

107

**Збагачення корисних копалин, 2005. – Вип. 24(65)**