

5. А. Н. Тихонов, В. А. Арсенин. Методы решения некорректных задач. М., «Наука», 1974.  
 6. А. Н. Тихонов. О методах регуляризации задач оптимального управления.— «ДАН», 1965, т. 162, № 4.  
 7. Y. Vassonier. Contribution of l'etude de l'orbite fermee.— "CERN", 1965, № 35.

Поступила в редакцию  
 17 января 1974 г.;  
 окончательный вариант —  
 31 марта 1975 г.

УДК 661.63.001.57 : 658.5.011.56

Е. А. ДОМБРОВСКИЙ, Е. С. КРИЧЕВСКИЙ, В. В. СТАЛЬСКИЙ  
 (Ленинград — Таллин)

### МАШИННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Известно, что для автоматизации технологического процесса необходимо провести его исследование как объекта автоматического управления, т. е. выявить динамические функциональные связи между входными и выходными его параметрами. Наличие математической модели объекта позволяет, как известно, получить все исходные данные для выбора структуры и параметров регулятора на основе моделирования работы объекта при различных возмущениях.

Цель данной работы — построение линейной модели технологического процесса производства суперфосфата на основе его физико-математического описания и исследование работы этой модели при типичных возмущениях, характерных для данного объекта.

Представим физико-математическую модель, приведенную в [1], в виде эквивалентной структурной схемы (рис. 1).

В соответствии с этой схемой можно получить передаточные функции по интересующим нас каналам «вход — выход».

Несмотря на то что в литературе описана методика подобных преобразований [2, 3], физико-химические особенности конкретного объекта требуют индивидуального подхода. Что касается рассматриваемого процесса переработки апатита в суперфосфат, то, насколько нам известно, в литературе отсутствуют данные по математическому описанию и исследованию этого процесса.

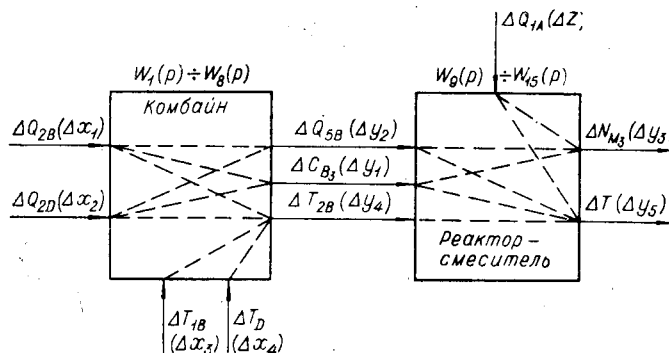


Рис. 1. Эквивалентная схема объекта.

Рассмотрим контур 1 по каналам «расход кислоты, воды — концентрация кислоты» и контур 2 по каналам «расход кислоты, воды — консистенция пульпы» (см. рис. 1).

Для основных выходных величин объекта в операторной форме, считая начальные условия нулевыми, можно записать:

$$\Delta \hat{y}_1(p) = W_3(p) \Delta \hat{x}_1(p) + W_4(p) \Delta \hat{x}_2(p), \quad (1)$$

$$\Delta \hat{y}_3(p) = W_9(p) \Delta \hat{z}(p) + W_{10}(p) [W_1(p) \Delta \hat{x}_1(p) + W_2(p) \Delta \hat{x}_2(p)] + W_{11}(p) \Delta \hat{y}_1(p), \quad (2)$$

где знаком  $\wedge$  над символом переменной отмечены изображения по Лапласу.

Условные обозначения параметров модели приняты по структурной схеме [1].

Приступим к выводу передаточных функций.

При вычислении  $W_3(p)$  базируемся на выражениях математической модели [1]. Материальный баланс рассматриваем по каналу «расход кислоты — концентрация кислоты». Поскольку процесс растворения в основном определяется механизмом перемешивания, а не скоростью реакции, которая, по существу, сводится к вероятностному столкновению молекул воды и кислоты, будем считать комбайн смесителем идеального перемешивания. В связи с этим  $C_{B_2} = C_{B_3}$ .

При выводе  $W_3(p)$  считаем, что  $Q_{4B} = Q_{2B}$ . Так как в комбайне для воздействия  $Q_{2B}(t)$  существует транспортное запаздывание  $\tau_1$  (14 с), представим это воздействие в виде  $Q_{2B}(t - \tau_1)$ . Теперь основные уравнения запишутся таким образом:

$$\frac{d}{dt} [V_{2B} C_{B_3}(t)] = Q_{2B}(t - \tau_1) C_{B_1} - Q_{5B}(t) C_{B_3}(t), \quad (3)$$

$$Q_{5B}(t) = Q_{2B}(t - \tau_1) + Q_{2D}. \quad (4)$$

Выражение (3) содержит нелинейности вида произведений двух переменных. Линеаризуем его в окрестности стационарного режима. Переходя к малым отклонениям (вариациям) и вычитая уравнения статики, получим

$$\tilde{V}_{2B} \frac{d\Delta C_{B_3}(t)}{dt} = (\tilde{C}_{B_1} - \tilde{C}_{B_3}) \Delta Q_{2B}(t - \tau_1) - \tilde{Q}_{5B} \Delta C_{B_3}(t),$$

где знаком  $\sim$  отмечены стационарные значения величин;  $\Delta$  — знак малого отклонения.

Преобразуя по Лапласу, при нулевых начальных условиях получим

$$W_3(p) = \frac{\Delta \hat{C}_{B_3}(p)}{\Delta \hat{Q}_{2B}(p)} = \frac{K_1}{T_1 p + 1} e^{-p\tau_1}. \quad (5)$$

Здесь

$$K_1 = \frac{\tilde{C}_{B_1} - \tilde{C}_{B_3}}{\tilde{Q}_{5B}}; \quad T_1 = \frac{\tilde{V}_{2B}}{\tilde{Q}_{5B}}.$$

При вычислении  $W_4(p)$  материальный баланс рассматриваем по каналу «расход воды — концентрация кислоты». Для воздействия  $Q_{2D}(t)$  также существует транспортное запаздывание  $\tau_1$  (14 с), поэтому представим это воздействие в виде  $Q_{2D}(t - \tau_1)$ . Тогда, базируясь на выражениях (3) и (4), после преобразований, аналогичных предыдущим, получим

$$W_4(p) = \frac{\Delta \hat{C}_{B_3}(p)}{\Delta \hat{Q}_{2D}(p)} = - \frac{K_2}{T_1 p + 1} e^{-p\tau_1}, \quad (6)$$

где

$$K_2 = \frac{\tilde{C}_{B_2}}{\tilde{Q}_{5B}}$$

Подставляем значение передаточных функций  $W_3(p)$  и  $W_4(p)$  в уравнение (1). В результате

$$\Delta \hat{y}_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1} e^{-p\tau_1} \Delta \hat{x}_1(p) - \frac{K_2}{T_1 p + 1} e^{-p\tau_1} \Delta \hat{x}_2(p). \quad (7)$$

Аналогичным путем выведены передаточные функции по контуру 2. После ряда преобразований и подстановки значений передаточных функций  $W_1(p) \div W_4(p)$ ,  $W_9(p) \div W_{11}(p)$  в уравнении (2) с учетом (1) получено окончательное выражение для выходной величины консистенции пульпы (суспензии)

$$\begin{aligned} \Delta \hat{y}_3(p) = & \frac{K_3}{T_3 p + 1} \Delta \hat{z}(p) + \frac{K_4}{T_4 p + 1} e^{-p\tau_2} \left[ \frac{1}{T_2 p + 1} \Delta \hat{x}_1(p) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{T_2 p + 1} \Delta \hat{x}_2(p) \right] + \frac{K_5}{T_5 p + 1} e^{-p\tau_2} \left[ \frac{K_1}{T_1 p + 1} e^{-p\tau_1} \Delta \hat{x}_1(p) - \right. \\ & \left. - \frac{K_2}{T_1 p + 1} e^{-p\tau_1} \Delta \hat{x}_2(p) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где значения  $K_1$ ,  $K_2$  и  $T_1$  те же, что и по контуру 1;

$$\begin{aligned} K_3 = & \frac{\beta_1 \tilde{\rho} \left( 1 - \frac{\tilde{\rho}}{\rho_A} \right)}{\tilde{\rho}_{LB} \tilde{\lambda}_1 \tilde{Q}}; \quad T_2 = \tilde{S} \tilde{\rho}_{2B} \frac{2\tilde{H}_{2B}}{\tilde{Q}_{5B}}; \\ T_3 = & \frac{\tilde{V} \tilde{\rho} \tilde{\beta}_1}{\rho_{LB} \tilde{\lambda}_1 \tilde{\eta}_2 \tilde{Q}}; \quad K_4 = \frac{\tilde{\rho} \tilde{\beta}_1}{\tilde{Q} \tilde{\lambda}_2} \left[ 1 - \tilde{Q} \tilde{\lambda}_3 - \left( \frac{1}{\rho_{LB}} - \frac{\beta_2 \tilde{Q}_{5B}}{\rho_{LB}^2} \right) \tilde{\rho} \right]; \quad T_4 = \frac{\tilde{V} \tilde{\rho} \tilde{\beta}_1}{\tilde{Q} \tilde{\lambda}_2 \tilde{\eta}_2}; \\ K = & \frac{\tilde{Q}_{5B}}{\frac{\tilde{Q} \tilde{\lambda}_4}{\rho \tilde{\beta}_1} + \left( \frac{1}{\beta_3} + \frac{1}{\beta_4} \right) \left( \frac{\tilde{Q}_{5B} \beta_5 \tilde{\rho} \tilde{C}_{LB}}{\rho_{LB}^2} + \frac{\tilde{Q} \tilde{\lambda}_5}{\rho} \right) + \frac{K_2 \tilde{V} \tilde{C}_{A_2}}{\beta_3} \left( \frac{b}{a} + \frac{l}{a} \right)}; \\ T_5 = & \frac{\tilde{V} \left( \frac{1}{\beta_3} + \frac{1}{\beta_4} \right)}{\tilde{Q}_{5B}} K_5. \end{aligned}$$

Значение промежуточных величин:

$$\begin{aligned} \beta_1 = & \frac{\partial N}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\tilde{\varphi}}; \quad \beta_2 = \frac{\partial \rho_{LB}}{\partial Q_{5B}} \Big|_{Q_{5B}=\tilde{Q}_{5B}}; \quad \beta_3 = \frac{\partial N}{\partial C_{B_4}} \Big|_{C_{B_4}=\tilde{C}_{B_4}}; \\ \beta_4 = & \frac{\partial N}{\partial C_{L_2}} \Big|_{C_{L_2}=\tilde{C}_{L_2}}; \quad \beta_5 = \frac{\partial \rho_{LB}}{\partial C_{LB}} \Big|_{C_{LB}=\tilde{C}_{LB}}; \quad \tilde{\rho} = \frac{\tilde{Q}}{\frac{\tilde{Q}_{5B}}{\rho_{LB}} + \frac{\tilde{Q}_{4L}}{\rho_A}}; \\ \tilde{\rho}_{LB} = & \frac{\tilde{Q}_{5B}}{\frac{\tilde{Q}_{5B}}{\rho_B} + \frac{\tilde{Q}_L}{\rho_L}}; \quad \tilde{\varphi} = \frac{100}{\tilde{C}_{LB}} \left( 1 - \frac{\tilde{\rho}}{\rho_{LB}} \right); \quad C_{LB} = C_{B_4} + C_{L_2}; \\ \tilde{\eta}_2 = & 0,845 \frac{\tilde{\mu}^{0,05} \tilde{n}^{2,95} \tilde{d}^{4,9}}{\tilde{g}^{0,95} \tilde{\rho}^{0,05}}; \quad \tilde{\lambda}_1 = \frac{100 (\tilde{\rho}_A + \tilde{\rho}_{LB})}{\tilde{C}_{LB} \tilde{\rho}_A \left( \frac{\rho_{LB}}{\rho_A} \varphi + \frac{100}{\tilde{C}_{LB}} \right)}; \end{aligned}$$

$$\tilde{\lambda}_2 = \frac{100\tilde{\rho}_A \tilde{\rho}_{LB} \tilde{C}_{LB} (\tilde{\rho}_A + \tilde{\rho}_{LB})}{(\tilde{\rho}_A 100 + \tilde{\rho}_{LB} \tilde{C}_{LB} \tilde{\varphi})^2}; \quad \tilde{\lambda}_3 = \frac{100\beta_2 \tilde{\rho}_A}{\tilde{\rho}_{LB} (\tilde{\rho}_A 100 + \tilde{\rho}_{LB} \tilde{C}_{LB} \tilde{\varphi})};$$

$$\lambda_4 = \frac{\tilde{\rho}_{LB} \tilde{C}_{LB} (\tilde{\rho}_A - \tilde{\rho})}{\tilde{\rho}_A \left( \frac{\tilde{\rho}_{LB}}{\tilde{\rho}_A} \tilde{\varphi} + \frac{100}{\tilde{C}_{LB}} \right)};$$

$$\tilde{\lambda}_5 = \frac{\tilde{\rho}_{LB} \left( \frac{\tilde{\rho}}{\tilde{\rho}_A} \tilde{\varphi} - \frac{100}{\tilde{C}_{LB}} \right)}{\frac{\tilde{\rho}_{LB}}{\tilde{\rho}_A} \tilde{\varphi} + \frac{100}{\tilde{C}_{LB}}} + \frac{\tilde{\rho}\beta_5 100}{\tilde{\rho}_{LB} \left( \frac{\tilde{\rho}_{LB}}{\tilde{\rho}_A} \tilde{\varphi} + \frac{100}{\tilde{C}_{LB}} \right)}.$$

$$\eta(t - \tau_1) = \begin{cases} 1, & \text{если } t > \tau_1; \\ 0, & \text{если } t \leq \tau_1; \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \Delta y_3(t) = & K_3 \Delta z \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right) \eta(t) + K_4 (\Delta x_1 + \Delta x_2) \times \\ & \times \left[ 1 - \frac{T_2}{T_2 - T_4} e^{-\frac{t - \tau_2}{T_2}} + \frac{T_4}{T_2 - T_4} e^{-\frac{t - \tau_2}{T_4}} \right] \eta(t - \tau_2) + K_5 (K_1 \Delta x_1 - \\ & - K_2 \Delta x_2) \left[ 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_5} e^{-\frac{t - \tau_3}{T_1}} + \frac{T_5}{T_1 - T_5} e^{-\frac{t - \tau_3}{T_5}} \right] \eta(t - \tau_3), \quad (10) \end{aligned}$$

$$\eta(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t > 0; \\ 0, & \text{если } t \leq 0; \end{cases} \quad \eta(t - \tau_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } t > \tau_2; \\ 0, & \text{если } t \leq \tau_2; \end{cases}$$

$$\eta(t - \tau_3) = \begin{cases} 1, & \text{если } t > \tau_3; \\ 0, & \text{если } t \leq \tau_3, \end{cases}$$

где  $\tau_1 = 14$  с,  $\tau_2 = 24$  с,  $\tau_3 = \tau_1 + \tau_2 = 38$  с получены из эксперимента. Таким образом получена линейная модель (7), (8) объекта и выражения для выходных сигналов (9), (10) при ступенчатых входных воздействиях. С целью проверки пригодности найденной модели для описания данного технологического процесса представляет интерес сравнить поведение модели и объекта при различных ступенчатых возмущениях. Такая работа была проделана.

Для примера можно привести результаты исследования динамики объекта по контуру 1. Значения  $T_1$ ,  $K_1$  и  $K_2$  были вычислены для рабочей точки на основании данных технологического регламента и обмеров непосредственно на объекте (см. таблицу).

Затем была составлена программа для вычислительной машины типа HP2120 и на автоматическом графопостроителе построены графики изменения  $\Delta y_1$  во времени по трем вариантам ступенчатых входных возмущений типа

$$\Delta x(t) = \Delta x \eta(t - \tau_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } t > \tau_1; \\ 1, & \text{если } t \leq \tau_1. \end{cases}$$

Полученная аналитическая кривая 2 на рис. 2 показала удовлетворительное совпадение с экспериментальной кривой 1.

Наименование	Размерность	Варианты		
		1	2	3
Рабочая точка	$y_1^0, \%$	68,38		
	$x_1^0, \text{кг/с}$	3,838		
Ступенчатые возмущения входа	$\Delta x_1, \text{кг/с}$	0	-0,342	-0,342
	$\Delta x_2, \text{кг/с}$	+0,0342	0	+0,0342
Отклик на выходе	$\Delta y_1, \%$	-0,554	-0,536	-1,09
Начальные и граничные условия		$\Delta y_1 = 0$ при $t \leq 14$ с $0 \leq t \leq 350$ с $65,0\% \leq y_1 \leq 69,0\%$		

Обработка данных и вычислительные работы проводились в Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения АН СССР.

Значения коэффициентов, параметров в рабочих точках, ступенчатых возмущений, а также начальных и граничных условий представлены в таблице.

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. Десятипроцентные ступенчатые возмущения по входам  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$  взаимно компенсируются, что предопределяет необходимость регулирования соотношения этих параметров, но не их абсолютных величин и, следовательно, снимает ограничения по производительности технологического процесса.

2. Характер изменения величины концентрации  $C_{B_3}$  на выходе существенно зависит от входной концентрации  $C_{B_1}$  установившегося значения общего расхода кислоты  $Q_{B_5}$  и объема комбайна  $V_{2B}$  (значения коэффициентов усиления и постоянной времени).

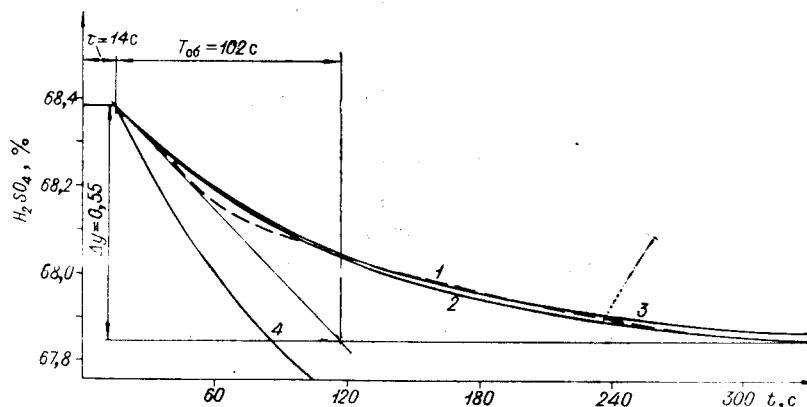


Рис. 2. Кривые изменения  $\Delta y_1(t)$  при ступенчатых возмущениях входных параметров  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$ :

1 — экспериментальная кривая, снятая при  $\Delta x_1 = 0$ ;  $\Delta x_2 = +10\% x_2$ ; 2 — кривая  $\Delta y_1(t)$  при  $\Delta x_1 = 0$ ;  $\Delta x_2 = +10\% x_2$ ; 3 — кривая  $\Delta y_1(t)$  при  $\Delta x_1 = -10\% x_1$ ;  $\Delta x_2 = 0$ ; 4 — кривая  $\Delta y_1(t)$  при  $\Delta x_1 = -10\% x_1$ ;  $\Delta x_2 = +10\% x_2$ .

Отсюда, в частности, следует указать на необходимость при выборе (конструировании) комбайнов учета заданной технологией величины выходной концентрации.

3. Ступенчатые возмущения входных воздействий  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$  соотносятся при сравнении по отклику на выходе как  $\Delta x_2/\Delta x_1=0,1$ .

Поэтому, учитывая то, что  $\Delta x_1$  является регулирующим воздействием для выходной величины  $\Delta y_3$ , предпочтительнее регулирование  $\Delta y_1$  вести по каналу  $\Delta x_2 \rightarrow \Delta y_1$ .

Аналогичная работа была выполнена и по исследованию других каналов эквивалентной схемы объекта (см. рис. 1).

На основе разработанной модели на Маардуском комбинате была синтезирована АСР, которая внедрена в производство и дает экономический эффект  $\sim 60\,000$  руб. в год.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Домбровский, Е. С. Кричевский. Аналитическое решение конкретной задачи физико-математического моделирования процесса дозировки реагентов в производстве суперфосфата методом структурной декомпозиции.— «Автометрия», 1975, № 1.
2. В. В. Кафаров. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М., «Химия», 1968.
3. Р. Фрэнкс. Математическое моделирование в химической технологии. М., «Химия», 1971.

*Поступила в редакцию  
30 сентября 1974 г.;  
окончательный вариант —  
27 января 1975 г.*

УДК 681.3.06 : 681.322

**В. А. ГАВРИЛИН, Б. И. ШИТИКОВ**

(Москва)

### **МОНИТОР ПРИОРИТЕТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРЕРЫВАНИЙ В СИСТЕМЕ ВВОДА — ВЫВОДА ЭВМ М-6000**

Системы автоматизации экспериментов (САЭ), построенные на основе малой ЭВМ М-6000, получают все большее распространение. В процессе развития и расширения САЭ неизбежно возникает проблема повышения эффективности использования ЭВМ, что, как показывает опыт, в большей степени зависит от того, насколько хорошо организовано управление работой устройств ввода — вывода (УВВ) [1, 2]. Так, производительность ЭВМ можно повысить путем организации параллельной работы устройств ввода — вывода с соблюдением приоритетных соотношений между ними. Однако ни аппаратные средства ЭВМ М-6000, ни программные средства основной управляющей системы (ОУС) не обеспечивают приоритетного обслуживания запросов от УВВ, что очень часто на практике приводит к нежелательным прерываниям. Кроме того, отсутствие возможности изменять программными средствами приоритетные соотношения также вызывает определенные трудности в организации работы УВВ синхронного типа (например, телетайпа) параллельно с устройствами других типов. В работе [3] последняя трудность