

УДК 681.5

А. П. КУЗНЕЦОВ, доктор технических наук, В. В. ЛОБКО, аспирант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

## СИНТЕЗ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ

Рассмотрен синтез регуляторов для автоматизированной системы управления технологического процесса операции выщелачивания на сильвинитовой обогатительной фабрике при производстве минеральных калийных удобрений по параметрам: плотность, уровень раствора, влажность в полуфабрикатах готовой продукции.

**И**зменение динамических характеристик промышленных объектов в процессе их функционирования снижает эффективность использования традиционных методов автоматического регулирования и делает первоначально настроенный автоматический регулятор неоптимальным или неработоспособным. Настройки становятся либо ослабленными, что влечет за собой потерю качества регулирования, либо слишком острыми, следствием этого может стать потеря устойчивости. Как показывает практика, замена физических регуляторов на программные, реализуемые в микропроцессорных контроллерах, без изменения алгоритмов регулирования, оказывается малоэффективной [1, 2]. Алгоритмы автоматизированной настройки, позволяющие приблизить систему регулирования к адаптивной, стали составной частью математического обеспечения большинства микропроцессорных контроллеров. На современном этапе большое внимание уделяется разработке адаптивных и самонастраивающихся систем с более совершенными регуляторами и алгоритмами их оптимальной настройки.

**Общая характеристика технологического процесса.** Обогащение руды в Третьем рудоправлении РУП «ПО «Беларуськалий» включает в себя подготовительные, основные и вспомогательные операции, составляющие производство нескольких видов калийных минеральных удобрений.

Одна из основных операций на сильвинитовой обогатительной фабрике (СОФ) – выщелачивание хлорида натрия из флотационного сильвинитового концентрата для обеспечения соответствия готовой продукции первому сорту, с массовой долей (м. д.) хлорида калия – не менее 95,0 %. В отделении выщелачивания СОФ размещены: пятикамерная флотационная машина, ленточные вакуум-фильтры, центрифуги, накопительные емкости, гидроциклоны, насосы и конвейеры [3, 4]. Управляет технологическим процессом оператор. В качестве выщелачивающего (ВР) используют раст-

вор, содержащий 2–4 % хлористого калия, а для поддержания необходимой плотности продукта в техпроцессе выщелачивания – циркулирующий раствор (ЦР), насыщенный по KCl и NaCl (фильтрат вакуум-фильтров, дренажные воды).

Концентрат хлористого калия конвейером № 2 подается в отделение выщелачивания и поступает в загрузочное устройство флотационной машины; в это устройство закачивают насосами выщелачивающий и циркулирующий растворы. Отфильтрованный концентрат продукции содержит 86–89 % KCl, в жидкой фазе – от 9 до 11 %. Количество выщелачивающего раствора должно быть таким, чтобы на выходе с отделения выщелачивания получить концентрат с содержанием 95,0–95,5 % KCl.

Для создания необходимых условий технологического процесса выщелачивания и снижения жидкой фазы на фильтрации готового продукта в флотационной машине требуется поддерживать плотность раствора в пределах от 0,5 до 1,0 соотношения жидкой и твердой составляющих (Ж : Т). Такое соотношение достигается изменением количества циркулирующего и выщелачивающего растворов, подаваемых в флотомашину. Концентрат готовой продукции с содержанием м. д. KCl 95,0–96 % и влажностью 4–8 % по системе конвейеров подается в отделение сушки СОФ.

**Система автоматизированного регулирования в техпроцессе отделения выщелачивания СОФ.** Для получения готового продукта с м. д. KCl, равной 95 %, необходимо подать на выщелачивание строго определенное количество ВР, пропорциональное количеству отфильтрованного концентрата готовой продукции. Недостаток ВР ведет к появлению бракованной продукции с м. д. KCl менее 95 %, а избыток раствора ведет к экономическим потерям.

Задание для системы подачи выщелачивающего раствора оператор задает вручную по косвенным параметрам, не имея информации по фак-

тическому содержанию м. д. КСІ в отфильтрованном концентрате. Для обеспечения требуемого качества в готовой продукции оператор задает коэффициент соотношения ( $K$ ) количества выщелачивающего раствора, пропорциональный количеству концентрата, подаваемого на отделение. Коэффициент  $K$  вводится на мнемосхеме, в программном пакете WinCC, используемом в АСУТП СОФ. Рассчитывают его по формуле

$$K = \frac{F_{вр}}{0,9W_{2к}}, \quad (1)$$

где  $F_{вр}$  – расход выщелачивающего раствора, м<sup>3</sup>/ч; 0,9 – коэффициент, учитывающий влагу в концентрате;  $W_{2к}$  – масса концентрата на входе в отделение выщелачивания (показания весов конвейера № 2), т/ч.

На эффективную работу вакуум-фильтра влияет нагрузка по фильтруемому продукту и его плотность. Измерение плотности продукта питания фильтров  $P$  (соотношение жидкой и твердой фаз, подаваемых в пятикамерную флотомашину, Ж : Т) затруднено целым рядом технических факторов, поэтому ее определяют расчетным путем.

Величину плотности рассчитывают по формуле

$$P = \frac{F_{вр} + F_{цр} + F_{жфк}}{0,9W_{2к}}, \quad (2)$$

$F_{вр}$  – расход выщелачивающего раствора, м<sup>3</sup>/ч;  $F_{цр}$  – расход циркулирующего раствора, м<sup>3</sup>/ч;  $F_{жфк}$  – жидкая фаза концентрата, м<sup>3</sup>/ч;  $W_{2к}$  – масса концентрата на конвейере № 2, т/ч.

Уровень раствора в флотомашине постоянно изменяется. Колебания уровня составляют 17–20 см. Чтобы стабилизировать уровень, оператор изменяет производительность вакуум-фильтров, тем самым воздействует на процесс фильтрации и влажность готового концентрата

**Синтез структурной схемы регулятора.** В рассматриваемой схеме АСУТП (рисунок 1) отсутствует автоматическая регулировка параметров техпроцесса по содержанию м. д. КСІ в продуктах обогащения (на мировом рынке отсутствуют приборы с подходящими характеристиками для автоматического непрерывного контроля содержания м. д. КСІ в руде, продуктах обогащения, готовой продукции). Информацию о м. д. КСІ в готовом продукте оператор получает по данным ОТК, примерно через один час после технологических операций сушки и грануляции.

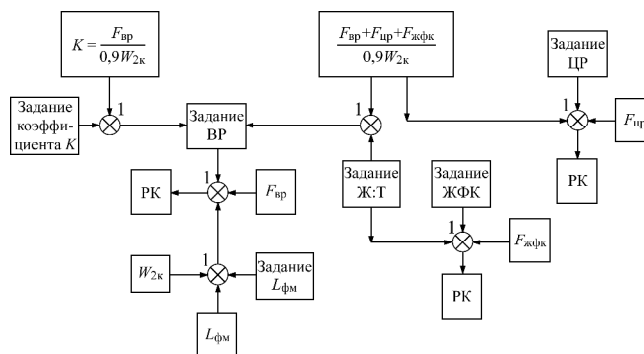


Рисунок 1 – Функциональная схема АСУТП отделения выщелачивания СОФ:

$W_{2к}$  – масса флотационного концентрата на конвейере № 2; ЖФК – жидкая фаза концентрата, подаваемого в флотационную машину; 1 – блок сравнения; ВР – выщелачивающий раствор; РК – регулирующий клапан; ЦР – выщелачивающий раствор;  $L_{фм}$  – уровень раствора в флотационной машине; Ж : Т – отношение жидкой и твердой составляющих раствора в флотационной машине

Регулирование по м. д. КСІ в техпроцессе можно выполнить, регулируя влажность в концентрате продукции на выходе отделения. Зависимость значений м. д. КСІ от влажности получена в результате исследований стандартных образцов в полуфабрикатах продукции с помощью прибора, предназначенного для автоматизированного измерения модулей коэффициентов передачи и отражения коаксиальных и волноводных устройств [3].

По результатам измерений определена зависимость значений частотных характеристик сигналов от содержания массовой доли КСІ и влажности в исследованных образцах продукции (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты измерений частотных характеристик сигналов в зависимости от массовой доли и влажности

Массовая доля КСІ, %, в СО	Влажность $W$ , %, в СО	Частота $f$ , ГГц
90,80 ±0,14	3,02	27,07
93,17 ±0,16	4,65	29,36
95,0 ±0,14	5,22	36,50
95,7 ±0,16	5,02	34,59
96,0 ±0,10	4,68	31,07
96,60 ±0,10	4,00	33,03

В качестве стандартных образцов использован концентрат готовой продукции после техпроцесса отделения выщелачивания, взятый с конвейера методом случайного отбора. Содержание калия в образцах определено химическим методом в лаборатории.

В технологическом процессе СОФ перед операцией сушки производится непрерывный приборный контроль влажности в концентрате [4].

В схему (см. рисунок 1) введем корректирующее звено (рисунок 2).

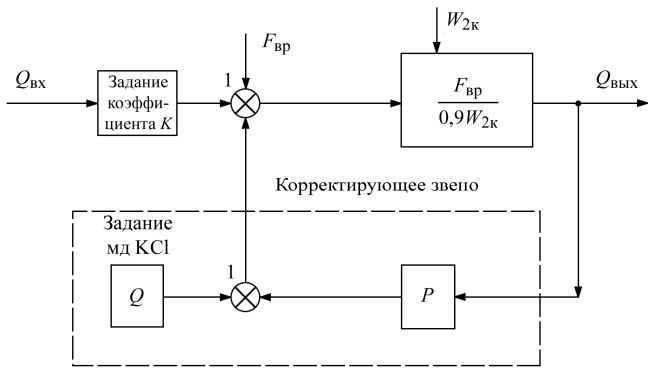


Рисунок 2 – Структурная схема канала управления:  
1 – блок сравнения; P – блок измерения влажности

Систему управления технологическим процессом (см. рисунок 1) представим в виде двухмерного объекта с передаточными функциями прямых и перекрестных каналов (рисунок 3). Прямые каналы регулирования в схеме (см. рисунок 3) представляют соотношение плотности Ж : Т и расчет коэффициента K.

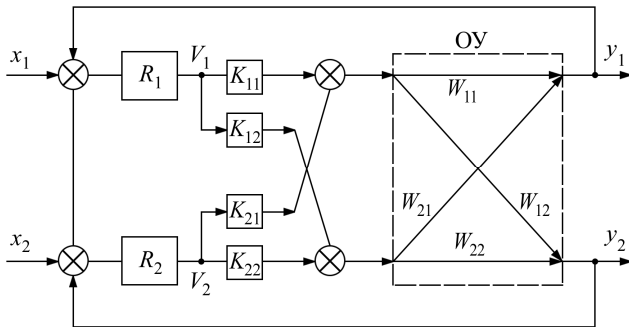


Рисунок 3 – Структурная схема объекта управления с компенсатором и корректирующими звеньями:

$R_1, R_2$  – регуляторы; ОУ – объект управления;  $x_1, x_2$  – задание;  $y_1, y_2$  – выходные переменные;  $K_{12}, K_{21}$  – компенсирующие связи;  $K_{11}, K_{22}$  – корректирующие звенья;  $V_1, V_2$  – управляющие сигналы регуляторов;  $W_{11}, W_{22}$  – передаточные функции прямых каналов;  $W_{12}, W_{21}$  – передаточные функции перекрестных каналов

Компенсирующие связи  $K_{12}, K_{21}$  включаются между управляющими сигналами  $V_1, V_2$  двух регуляторов (см. рисунок 3); в прямые каналы включены корректирующие звенья  $K_{11}, K_{22}$ . Условие компенсации для системы «объект + компенсатор» имеет вид

$$\frac{K_{21}}{K_{22}} = \frac{W_{21}}{W_{11}}, \quad (3)$$

$$\frac{K_{12}}{K_{11}} = \frac{W_{12}}{W_{22}}. \quad (4)$$

Если условия компенсации выполняются, то каналы передачи управляющих воздействий в объекте управления определяются передаточными функциями

$$V_1 = K_{11}W_{11}(1 - K_{св}), V_2 = K_{22}W_{22}(1 - K_{св}), \quad (5)$$

где  $V_1, V_2$  – передаточные функции каналов;  $K_{св}$  – степень связи объектов – безразмерная характеристика двухсвязного объекта, определяется формулой

$$K_{св} = \frac{W_{12}(s)W_{21}(s)}{W_{11}(s)W_{22}(s)}, \quad (6)$$

где  $s$  – оператор Лапласа.

Выполнение условий компенсации (3) и (4) обеспечивается включением в каналы управления корректирующего звена  $K_{11}$  или  $K_{12}$ . При этом корректирующее звено должно быть инерционным, числитель в выражении (3) или (4) представляется произведением элементарных сомножителей. Если множители с наименьшими постоянными времени составляют знаменатель оператора корректирующего звена, то коррекция уменьшает динамику контура регулирования, и для рассматриваемого технологического процесса уменьшается скорость реакции в схеме по параметрам одного из прямых каналов. В корректирующее звено требуется включить чистое запаздывание, обусловленное большим временем реакции по величине  $W_{2к}$  (см. рисунок 1); выразим величину запаздывания через оператор упреждения  $e^{(ab)\tau}$ , где  $\tau$  – постоянная времени.

Система имеет вид

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e^{-at} \\ e^{-bt} \end{bmatrix} y(t), \quad a \neq b. \quad (7)$$

Уравнению (7) соответствуют два апериодических звена с переменным коэффициентом передачи, работающие от общего входа (рисунок 4).

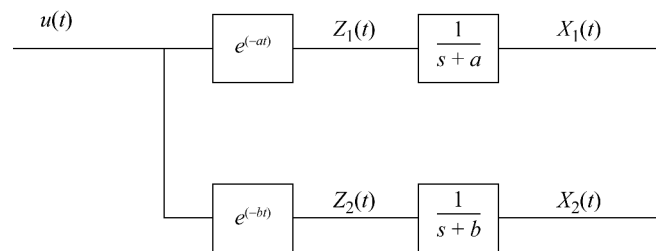


Рисунок 4 – Структурная схема для прямого канала системы регулирования

Передаточная функция (ПФ) апериодического звена

$$k(t, \tau) = e^{-a(t-\tau)}[t-\tau] = e^{-at}[t-\tau]e^{a\tau},$$

что соответствует схеме на рисунке 5, в связи с чем исходная система (см. рисунок 2) эквивалентна схеме, приведенной на рисунке 6.

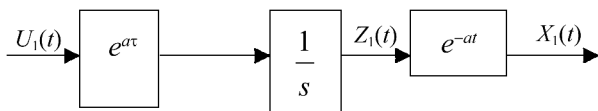


Рисунок 5 – Структурный элемент схемы

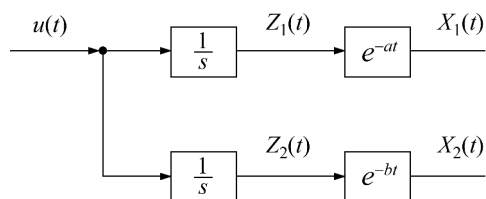


Рисунок 6 – Структурная схема системы

Следовательно,  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$  при любом  $U_1(t)$  независимо меняться не могут.  $X_1(t) = Z_1(t)e^{-at}$ ;  $X_2(t) = Z_2(t)e^{-bt}$ ; так как  $Z_1(t) = Z_2(t)$ , то  $X_2(t) = X_1(t)e^{(b-a)t}$ .

Система (7) не может быть переведена управляющим сигналом из заданного состояния в любое требуемое, если это состояние не принадлежит указанной линии (множеству).

Далее, анализируя систему (см. рисунок 3), регуляторы  $R_1$ ,  $R_2$  можно рассчитать любым традиционным методом.

Таким образом, в статье рассмотрен синтез двухмерного регулятора с корректирующими звеньями в прямых каналах управления по пара-

Получено 10.11.2008

**A. P. Kuznezov, V. W. Labko.** Syntheses automated systems of the regulation at production of the potassium fertilizers.

It is considered syntheses regulator for automated managerial system of measurement of a mass fraction in finished goods and products of enrichment, by manufacture of potash.

метрам технологического процесса: плотность, уровень, влажность в полуфабрикатах готовой продукции при производстве калийных удобрений. Регулирование по влажности на выходе отделения выщелачивания в заданных пределах позволяет избежать брака и перерасхода топлива в технологической операции сушки концентрата готовой продукции. Корректировка коэффициента  $K$  в технологическом процессе с помощью системы автоматических регуляторов позволила бы уменьшить потери качества продукции.

#### Список литературы

- 1 Методы классической и современной теории автоматического управления : учеб. В 5 т. / под общ. ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления. – 744 с.; Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления. – 616 с.
- 2 **Ерофеев, А. А.** Теория автоматического управления : учеб. для вузов / А. А. Ерофеев. – СПб. : Политехника, 2002. – 302 с.
- 3 **Лобко, В. В.** Разработка системы измерения м. д. КС1 в продуктах обогащения при производстве минеральных удобрений / В. В. Лобко, Д. П. Кальченко, О. В. Руховец // Горная механика. – 2008. – № 1. – С. 95–99.
- 4 Промышленный технологический регламент № 3–06 / Белорусский государственный концерн по нефти и химии, РУП «ПО «Беларуськалий». – Введ. 2006-08-16. – Солигорск : РУП «ПО «Беларуськалий», 2006. – С. 17–52.