ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВХОДНОГО СИГНАЛА И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ НА ЦЕМЕНТНОМ ЗАВОДЕ

В. Б. Шифрин, Н. Г. Бизюк

Харьков

Применение современной вычислительной техники, в частности управляющих вычислительных машин (УВМ) в системе оперативного управления предприятием, позволяет перейти к автоматизации производства в целом.

Поскольку большинство сигналов, с которыми в этом случае приходится сталкиваться, носит стохастический характер, особую роль играют системы управления, оптимальные в смысле того или иного статистического критерия.

Для управления процессами приготовления сырьевых смесей на цементных заводах используется информация о химическом составе сырьевого шлама, который может колебаться в значительных пределах. Источниками этих колебаний являются неточности и ошибки в дозировке мела (известняка) и глины, нестабильность химического состава исходных материалов. Ошибки в дозировке, в свою очередь, вызываются многими причинами: неполной загрузкой бункера, изменением гранулометрического состава, нестабильностью влажности и др.

Поступление шлама на завод производится порциями, зависящими от наличия мела и глины в достаточных количествах и от состояния и количества работающего оборудования.

Экспериментальная проверка входного сигнала была выполнена с целью проверки, во-первых, гипотезы нормального распределения химического состава сырьевого шлама и определения его параметров: математического ожидания, дисперсии и корреляционной функции; во-вторых, соответствия распределения моментов времени поступления шлама распределению Пуассона. Было действительно выяснено, что химические составы порций шламов подчиняются нормальному закону, причем автокорреляционные функции имеют экспериментальный вид.

Таким образом, входной сигнал представляет собой последовательность импульсов одинаковой длительности $\tau_и$, нормально распределенных по амплитуде, статистически связанных и случайно следующих друг за другом. Для упрощения анализа сигнал $x(t)$ можно представить в виде произведения двух сигналов, как это показано на рис. 1.

$$x(t) = x_1(t)\, x_2(t).$$

Здесь сигнал $x_1(t)$ принимает значения, сохраняемые постоянными в случайных по длительности промежутках времени,

причем эти значения подчиняются закону распределения исходного сигнала. Сигнал $x_2(t)$ имеет длительность $\tau_и$, может принимать два неслучайных значения $+1$ и 0 и также появляется в случайные моменты времени. Из такого разбиения сигналов следует, что они взаимонезависимы и, следовательно,

$$m_x = m_{x_1} \cdot m_{x_2},$$

$$R_{xx}(\tau) = R_{x_1x_1}(\tau) R_{x_2x_2}(\tau) + m^2_{x_2} R_{x_1x_1}(\tau) + m^2_{x_1} R_{x_2x_2}(\tau).$$

Значения функции $x_1(t)$ связаны между собой, что характеризуется корреляционной функцией $R_{x_1}(i)$. Вероятность $p(\tau)$ изменения значения функции $x_1(t)$ в любом интервале t, $t+\tau$ зависит только от длительности интервала τ и не зависит от поведения функции вне этого интервала.

События, состоящие в изменении значения функции $x_1(t)$ являются независимыми. Число перемен значения функции $x_1(t)$ на ограниченном временном интервале подчиняется закону Пуассона. Учитывая это, математическое ожидание функции находим по одномерному дифференциальному закону распределения случайных значений этой функции

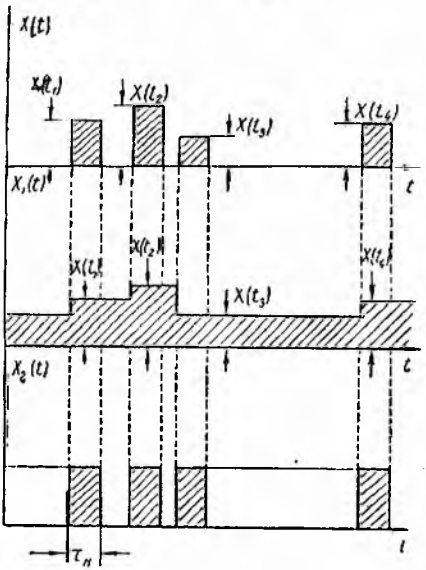

Рис. 1. Изменение химического состава сырьевого шлама при предварительном усреднении.

$$m_{x_1} = \int_{-\infty}^{\infty} x f_{x_1}(x)\, dx = m_A,$$

где m_A — математическое ожидание, полученное по найденному экспериментально распределению амплитуд.

Корреляционную функцию $R_{x_1x_1}(\tau)$ найдем по формуле

$$R_{x_1x_1}(\tau) = m\{[x_1(t) - m_{x_1}][x_1(t+\tau) - m_{x_1}] =$$

$$= \sum_{i=0}^{\infty} p_i m\{(x_n - m_x)(x_{n+i} - m_x)\},$$

где i — разница порядковых номеров промежутков;

n — порядковый номер промежутка, соответствующего величине $x(t)$;

p_i — вероятность того, что $x(t)$ и $x(t+\tau)$ разделены i промежутками.

$$R_{x_1x_1}(\tau) = e^{-\frac{\alpha\tau}{2}} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\alpha}{2}\tau\right)^i}{i!} R_A(i).$$

Сигнал $x_2(t)$ принимает одно из значений $+1$ или 0, причем вероятность того или иного значения определяется математическим ожиданием числа импульсов, которое равно математическому ожиданию числа перемен значений функции $x_1(t)$ в единицу времени α.

Одномерный дифференциальный закон распределения [2] функции $x_2(t)$

$$f_{x_2}(x) = \alpha\tau_и\delta(x-1) + (1-\alpha\tau_и)\,\delta(x).$$

Отсюда математическое ожидание функции $x_2(t)$ равно

$$m_{x_2} = \int_{-\infty}^{\infty} x f_{x_2}(x)\,dx = \alpha\tau_и \int_{-\infty}^{\infty} x\delta(x-1)\,dx +$$

$$+ (1-\alpha\tau_и) \int_{-\infty}^{\infty} x\delta(x)\,dx = \alpha\tau_и.$$

Двумерный дифференциальный закон распределения случайной функции $x_2(t)$ определяется четырьмя сочетаниями значений этой функции: $+1$, $+1$; $+1$, 0; 0, $+1$; 0, 0.

Учитывая, что дифференциальный закон распределения соответствует закону Пуассона, после преобразований получаем

$$P_{x_2x_2}(\tau) = \alpha\tau_и(1-\alpha\tau_и)e^{-2\alpha\tau}$$

при $\tau > \tau_и$, т. е. в случае, когда $x_2(\tau)$ соответствует какому-либо последующему импульсу. В случае $\tau < \tau_и$ оба значения переменной могут попадать на один импульс. Учитывая, что такое событие имеет равномерное распределение на неслучайной длительности импульса, соответствующую корреляционную функцию запишем в виде

$$R_{x_2x_2}(\tau) = \alpha\tau_и(1-\alpha\tau_и)\left[1 - \frac{\tau}{\tau_и} + \frac{\tau}{\tau_и}e^{-2\alpha\tau}\right].$$

Таким образом, математическое ожидание исследуемого сигнала равно

$$m_x = m_A\alpha\tau_и,$$

а автокорреляционная функция сигнала

$$R_{xx}(\tau) = \left\{ R_A(0)\,\alpha\tau_и(1-\alpha\tau_и)\,e^{-\frac{5\alpha\tau}{2}+\frac{\alpha\tau}{2}e^{-1}} + m_A^2\alpha\tau_и(1-\alpha\tau_и)\times \right.$$

$$\left. \times e^{-2\alpha\tau} \right\}\left[1(\tau-\tau_и) + \left(1 + \frac{\tau}{\tau_и} + \frac{\tau}{\tau_и}e^{-2\alpha\tau}\right)e^{2\alpha\tau}1(\tau_и-\tau)\right] +$$

$$+ R_A(0)\,\alpha^2\tau_и^2 e^{-\frac{\alpha\tau}{2}+\frac{\alpha\tau}{2}e^{-1}},$$

где $1(\tau-\tau_и)$ и $1(\tau_и-\tau)$ — единичные функции.

Для $\tau > \tau_и$ (что обычно выполняется в рассмотренных далее системах управления) автокорреляционная функция принимает вид суммы трех экспонент

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{k=1}^{3} A_k e^{-\beta_k \tau}.$$

Анализ числовых значений параметров автокорреляционной функции показывает, что, например, для Балаклейского цементного завода с достаточной точностью можно ограничиться одной экспонентой вместо трех.

Рассмотренные методы расчета колебаний химического состава сырьевых шламов основываются на экспериментально определяемых параметрах: среднем m_A, дисперсии σ_A^2, корреляционной функции $R_A(i)$ или $R_A(\tau)$. Очевидно, что проектирование новой системы управления при модификации уже действующего завода необходимо начинать с определения этих данных, тем более, что они определяются по уже имеющимся заводским контрольным измерениям.

По найденным автокорреляционным функциям возможна техническая реализация систем управления двух простых типов: разомкнутого и замкнутого, а также большого числа сложных: с автоподстройкой, с комбинированным воздействием, с самообучением и др. Два простых типа имеют некоторую аналогию с классическими методами, широко применяемыми на цементных заводах при порционном приготовлении шлама, а именно, метод разомкнутого управления близок с расчетом трех- и четырехкомпонентных сырьевых смесей, а метод замкнутого управления с коррекцией шлама, например, по титру. Однако в этом случае решаются статистические задачи, а на заводах поточного приготовления шлама неизбежна постановка статистических задач динамики.

Расчеты сырьевых смесей для действующих и вновь строящихся цементных заводов, проведенные в институте Южгипроцемент, показали, что задача оптимизации сырьевой смеси может быть решена. Колебания в содержании четырех основных окислов невелики, а их отношение уже обеспечивает смеси с параметрами, близкими к оптимальным.

Функции, связывающие параметры [1] КН, n и p с химическим составом, имеют линейный вид для малых отклонений от средних значений. В этом случае удобно ввести единый параметр $T_г(t)$, также линейно связанный с химическим составом. В частности, это может быть и титр готовой смеси.

Отклонение титра готовой смеси —

$$T_г(t) = T_c(t) + Ay(t),$$

где A зависит от химических составов исходных потоков; $T_c(t)$ — пересчитанное отклонение титра на входе.

Структурная схема объекта, построенная по формулам, показана на рис. 2, *а*.

Очевидно, что при работе оптимальной разомкнутой системы управления необходимо учесть ошибку измерения химического состава сырьевых шламов $n(t)$ таким образом, чтобы сформированное в звене $W^*(\tau)$ воздействие $y(t)$ возможно точнее компенсировало флуктуации $T_c(t)$.

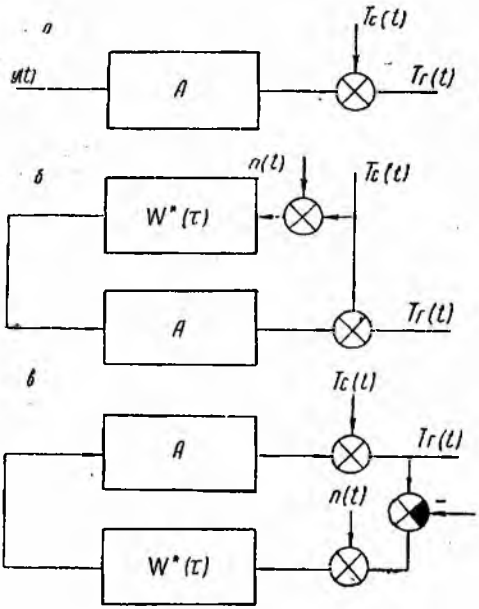

Рис. 2. Структурные схемы систем управления:
а — общая схема; *б* — разомкнутая система; *в* — замкнутая система.

На рис. 2, *б* показана структурная схема объекта и разомкнутой системы управления. При работе замкнутой системы управления (рис. 2, *в*) управляющее воздействие формируется в корректирующем звене $W^*(\tau)$, на которое подается сигнал обратной связи и помеха.

Поскольку химический состав с помощью квантометра) и титр определяются достаточно часто и быстро — за 10—15 минут — системы управления могут рассчитываться как непрерывные.

Рассматривая расчет оптимальных систем управления по разомкнутому и замкнутому циклам, необходимо отметить, что расчет в первом случае полностью соответствует задаче, поставленной и решенной Н. Винером [3], так как заключается в нахождении параметров линейного фильтра, имеющего такую импульсную переходную характеристику, что обеспечивается минимум критерия качества [4]

$$e(t) = [Q(t) - q(t)]^2.$$

Здесь $Q(t)$ — желательный, а $q(t)$ — реально существующий выходные сигналы. При выбранных условиях оптимальный фильтр определяется решением интегрального уравнения Винера — Хопфа:

$$R_{xQ}(\tau) = \int_0^\infty w^*(\varepsilon) R_{xx}(\tau - \varepsilon)\, d\varepsilon, \quad \tau \geqslant 0,$$

где $R_{xQ}(\tau)$ — взаимная корреляционная функция входного сигнала и желательного выходного; $w^*(\delta)$ — оптимальная импульсная

переходная функция фильтра; $R_{xx}(\tau - \varepsilon)$ — автокорреляционная функция входного сигнала. Поскольку параметры оптимального фильтра зависят от входного сигнала, а значит от режима работы карьерного участка, будут рассмотрены ошибки системы управления в двух случаях: при подстройке оптимального фильтра и без нее. Как показывает сравнение этих ошибок, подстройка параметров оптимального фильтра может не производиться. При этом ошибка поддержания заданной величины химического состава возрастает незначительно.

Для синтеза оптимальной импульсной переходной характеристики $w^*(\tau)$ по уравнению Винера — Хопфа необходимо имеющиеся у нас автокорреляционные функции сигнала и помехи преобразовать. Следуя методике [5] и учитывая данные экспериментальных исследований, введем обозначения:
$R_{QQ}(\tau) = Ae^{-a|\tau|}$ — автокорреляционная функция полезного входного сигнала; $R_{nn}(\tau) = Ne^{-\rho|\tau|}$ — автокорреляционная функция помехи, не коррелированной с полезным сигналом и дисперсией N.

Однако параметр ρ здесь является случайным. Поскольку расчет оптимального фильтра для такой помехи существенно затруднен, было принято следующее упрощение: параметр ρ был принят постоянным и ориентировочно равным $\frac{1}{t_{изм}}$, где $t_{изм} \approx$ $\approx 5 \div 6$ *мин* — минимальное время анализа.

Автокорреляционная функция полного входного сигнала

$$R_{xx}(\tau) = Ae^{-a|\tau|} + Ne^{-\rho|\tau|}.$$

Для рассмотренных сигналов оптимальная система управления, как известно, находится в виде звена с импульсной переходной функцией

$$w^*(\tau) = We^{-\omega\tau} + M\delta(\tau).$$

Методом неопределенных коэффициентов находим

$$w^2 = a\rho\,\frac{aN + \rho A}{aA + \rho N};$$

$$W = \frac{(w - a)(w - \rho)}{a - \rho};$$

$$M = \frac{w - a}{\rho - a}.$$

Таким образом, оптимальная фильтрация существенно уменьшает влияние помехи $|\overline{\varepsilon^2} < N|$ в случае, если отсутствует запаздывание при контроле химического состава (например, определяется титр).

Эффективность оптимального управления обеспечивается даже при времени измерения порядка двух часов. Следовательно,

при использовании современных методов анализа оптимальное управление тем более рационально.

В отличие от рассмотренной разомкнутой системы управления замкнутая система, кроме своей основной функции — стабилизации химического состава готового шлама при изменении химического состава сырьевых, позволяет частично компенсировать любые изменения в параметрах сырьевого передела.

Как и при разомкнутой системе управления, в данных химического анализа содержится уже описанная шумовая помеха. Этих данных достаточно для расчета оптимальной замкнутой системы управления по методам, рассмотренным в [6, 7]. Выполняя преобразования с нашими сигналами, получаем, что для нахождения оптимальной импульсной переходной характеристики корректирующего звена необходимо преобразовать структурную схему системы.

Соответствующие преобразования были выполнены и позволили получить оптимальную импульсную переходную функцию звена $w^*(\tau)$, обрабатывающего информацию о химическом составе и управляющего расходом шлама.

$$w^*(t) = Z^{-1}W^*(p) = \frac{1}{D}Z^{-1}W(p) =$$

$$= \frac{M}{D(1-M)} + \frac{We^{-\left(\omega+\frac{W}{M-1}\right)t}}{D(1-M)^2}.$$

Для случая немгновенного определения химического состава шлама в структурную схему системы управления необходимо внести еще одно звено, отражающее свойства объекта, — звено идеального запаздывания.

Соответствующее изображение искомого оптимального корректирующего звена

$$W^*(p) = \frac{1}{D}\frac{M\cdot\frac{W}{p+\omega}}{1-\left(M+\frac{W}{p+\omega}\right)e^{-p t_{\text{изм}}}}.$$

Рассмотренная в статье методика позволяет по минимальному количеству данных о карьере (или о работе карьерного участка) получить достаточно полное статистическое описание колебаний химического состава промежуточных шламов и на основе этих данных перейти к синтезу оптимальной системы управления.

Синтез и анализ оптимальных систем показали, что управление приготовлением шламов заданного химического состава может производиться с помощью оптимальных систем управления, рассчитанных на «средний» режим работы сырьевого передела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по производству цемента. Госстройиздат, 1965.
2. Н. А. Лифшиц, В. Н. Пугачев. Вероятностный анализ систем автоматического управления. Изд-во «Сов. радио», 1963.
3. N. Wiener. Extrapolation Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. The Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass, 1949.
4. К. У. Мериэм. Теория оптимизации и расчет систем управления с обратной связью. Изд-во «Мир», 1967.
5. Д. Х. Лэнинг, Р. Г. Беттин. Случайные процессы в задачах автоматического управления. ИЛ, 1958.
6. М. Пелегрен. Статистический расчет следящих систем. ИЛ, 1957.
7. Техническая кибернетика, часть 2. Под ред. В. В. Солодовникова. Изд-во «Машиностроение», 1968.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В АСУ

А. Ф. Панов

Харьков

Передача информации в АСУ имеет ряд существенных особенностей, которые необходимо учитывать при синтезе помехоустойчивых систем связи. Если в общем случае система передачи информации в связи состоит из приемного и передающего устройств, соединенных между собой однородной линией связи (эфир, кабельная линия и т. п.), то современная автоматизированная система управления крупным предприятием или экономическим районом имеет сложную иерархическую структуру [1, 3].

Структура каналов передачи информации в АСУ представляет собой весьма разветвленную сеть линий связи, разнообразных по протяженности, по помехоустойчивости (рядом с некоторыми линиями связи могут находиться мощные электроустановки), по типу линий связи (высоковольтные линии электропередачи, кабельные линии связи, радиолинии, специальные линии и т. д.), по трудности прокладывания их на территории предприятия.

По сравнению с информацией в связи информация в АСУ имеет сложный характер по объему, по ценности, по достоверности передачи. Носители информации в АСУ, даже в одном и том же комплексе, имеют разные формы, так как датчики информации, а также получатели информации, могут быть различными по принципам действия (аналоговые, дискретные, частотные, непрерывного действия, разового действия и т. д.).

В связи носитель информации строго одного типа для данной системы (в телефонии — речевые сигналы с определенной полосой частот; в телеграфии — сигналы, отображающие 32 буквы или другое определенное количество знаков; в радиосвязи — тем или иным способом модулированные сигналы).