Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им.Г.В.Плеханова, т./ХУШ, вып. 1, 1975 г.

СИНТЕЗ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СУШИЛЬНОМ БАРАБАНЕ

В.Г.Дейч, В.В.Стальский, С.В.Стороженко

Сушильный барабан как объект автоматического управления был рассмотрен ранее [4]. Предложенный вариант автоматической системы управления (АСУ) процессом сушки [1] внедрен и успешно работает на комбинате "Фосфорит" (г.Кингисепп). Основными управляющими воздействиями в этой системе являются температура и скорость сушильного агента, а нагрузка (расход кека на входе) выступает как основное возмущение.

Существенный интерес представляет также часто встречающийся на практике случай, когда технологические условия позволяют регулировать расход кека на входе, т.е. рассматривать его как управляющее воздействие. В этом случае основным возмущением, действующим на систему, следует считать влажность кека на входе. Эти предположения и кладутся в основу предлагаемого варианта АСУ сушильным барабаном.

Основным регулируемым параметром (выходом) является выходная влажность φ концентрата. В качестве входных величин следовало бы рассмотреть скорость сушильного агента V, расход кека $G_к$ и его влажность $\varphi_к$ (температуру сушильного агента в этом случае естественно стабилизировать автономной АСУ). Однако удобно рассматривать [5] в качестве входа не $\varphi_к$ и $G_к$ по отдельности, а их произведение $\varphi_к G_к$, поскольку такой подход позволяет "сэкономить" один канал вход-выход объекта и системы и тем облегчить задачу синтеза сложной АСУ.

Как неоднократно отмечалось в литературе, все каналы вход-выход для сушильного барабана являются глубоко нелинейными. Поэтому, считая все отклонения рассматриваемых величин от их средних значений относительно малыми, произведем линеаризацию объекта, заменяя величины их приращениями, а передаточные функции вход-выход представим в виде простейшей аппроксимации – инерционным звеном с запаздыванием.

Считаем, что рассматриваемый объект имеет входы $x_1 = \Delta(\varphi_к G_к) = \bar{\varphi}_к \Delta G_к + \Delta\varphi_к \bar{G}_к$ и $x_2 = \Delta V$; основной выход $y_1 = \Delta\varphi$. Через $\bar{\varphi}_к$ и $\bar{G}_к$ обозначены средние значения входной влажности кека и его расхода. Основное возмущение $x_1' = \Delta\varphi_к \bar{G}_к$ и управление $x_1'' = \bar{\varphi}_к \Delta G_к$ проходят по одному и тому же каналу. Передаточные функции каналов $x_1 \longrightarrow y_1$ и $x_2 \longrightarrow y_1$ соответственно имеют вид

$$W_{y_1 x_1}(p) = W_{11} = \frac{K_{11} e^{-p\tau_{11}}}{1 + pT_{11}} ;$$
$$W_{y_1 x_2}(p) = W_{12} = \frac{K_{12} e^{-p\tau_{12}}}{1 + pT_{12}} , \qquad (1)$$

где постоянные имеют следующие значения: $K_{11} = 6$; $\tau_{11} = 5{,}6$ мин; $T_{11} = 14$ мин; $K_{12} = 1{,}78$; $\tau_{12} = 1{,}2$ мин; $T_{12} = 8{,}7$ мин; первый индекс – номер выхода канала, а второй – входа.

Таким образом, запаздывание по каналу $x_2 \rightarrow y_1$ меньшее, но передаточный коэффициент по этому каналу относительно мал. Напротив, канал управления $x_1'' \longrightarrow y_1$ имеет большое запаздывание и большой передаточный коэффициент. Отсюда вывод: структура АСУ, способной обеспечить необходимое качество регулирования, должна быть двухсвязной [1].

Допустим, что помимо выходной влажности y_1 мы может измерять некоторый параметр y_2 , который хорошо коррелирует с y_1 и относительно которого запаздывание управления x_1'' существенно меньше, чем относительно y_1 . Тогда заранее видим, что, стабилизировав y_2 с помощью x_1'' (грубая система), мы "снимем" основную часть возмущения. Оставшаяся часть возмущения компенсируется более слабым управлением x_2 (точная система).

Чтобы придать этим соображениям строгость, рассмотрим следующую задачу. Предположим, объект регулирования с двумя выходами y_1 и y_2 подвержен действию возмущения, которое будем считать стационарным случайным процессом. Выходные величины y_1 и y_2 будем считать также стационарными случайными процессами, причем совместную плотность распределения $P(y_1, y_2)$ примем нормальной. (В случае рассматриваемой системы это предположение подтверждается измерениями.) Обозначим через $\bar{y}_1, \bar{y}_2$ математические ожидания; σ_1, σ_2 – среднеквадратические отклонения; r – коэффициент корреляции y_1 и y_2. Поставим вопрос о том, как изменится среднеквадратическое отклонение σ_1 при условии, что значение y_2 поддерживается равным $\bar{y}_2 = const$. Как известно [3], условное среднеквадратическое отклонение

$$(\sigma_1')^2 = M\left[(y - M(y_1|\bar{y}_2))^2 \,|\, y_2 = \bar{y}_2\right] = \int_{-\infty}^{\infty} \left[y_1 - M(y_1|\bar{y}_2)\right]^2 P(y_1|\bar{y}_2)\, dy_1 , \qquad (2)$$

где $M(y_1|\bar{y}_2)$, $P(y_1|\bar{y}_2)$ – условные математическое ожидание и плотность распределения величины y_1 при $y_2 = \bar{y}_2$;

$$P(y_1|\bar{y}_2) = P(y_1, \bar{y}_2)\left[\int_{-\infty}^{\infty} P(y_1, \bar{y}_2)\, dy_1\right]^{-1} . \qquad (3)$$

При нормальной плотности $P(y_1, \bar{y}_2)$ условная плотность $P(y_1|\bar{y}_2)$ также оказывается нормальной. Интеграл в формуле (2) вычисляется то-

явном виде, что дает

$$(\sigma_1')^2 = \sigma_1^2(1 - r^2) . \qquad (4)$$

Соотношение (4) можно интерпретировать следующим образом: стабилизируя величину y_2, мы добиваемся при тех же возмущениях уменьшения отклонения величины y_1 в среднем в $(\sqrt{1-r^2})^{-1}$ раз. Поскольку рассматривается линейная модель объекта, это соответствует тому, что с точки зрения регулирования величины y_1 возмущения, действующие на объект, уменьшаются в $(\sqrt{1-r^2})^{-1}$ раз.

Как показали предыдущие исследования [1], в качестве параметра y_2 в случае сушильного барабана целесообразно выбрать $\Delta T_б$ – отклонение температуры внутри барабана в точке, удаленной от входа приблизительно на 2/5 длины барабана (место измерения температуры находится экспериментально).

В самом деле, опытным путем установлено, что передаточная функция

$$W_{y_2 x_1}(p) = W_{21} = \frac{K_{21} e^{-p\tau_{21}}}{1 + pT_{21}} , \qquad (5)$$

где τ_{21} = 3 мин (при K_{21} = 2,52 и T_{21} = 5,2), т.е. существенно меньше, чем τ_{11}.

С другой стороны, коэффициент корреляции $\Delta T_б$ с выходной влажностью оказывается примерно равным 0,88. Таким образом, стабилизация y_2 ослабляет действие возмущений в $(\sqrt{1-0,88^2})^{-1} = (0,46)^{-1}$, т.е. более чем в два раза.

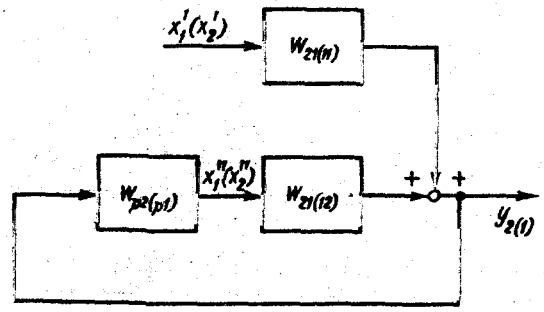
Синтез каждой из систем управления (грубой и точной) будем рассматривать как задачу аналитического конструирования регуляторов [2,7], т.е. будем искать структуру управляющего устройства из условия минимума функционалов (соответственно для точной и грубой систем)

$$J_1 = \int_0^\infty y_1^2 dt ; \qquad (6)$$

$$J_2 = \int_0^\infty y_2^2 dt \qquad (7)$$

при подаче на вход ступенчатого возмущения $x_1' = 1(t)$. Решать эту задачу будем в частотной области, используя методы, развитые Ч.Шелдоном [7]. Структурные схемы систем одинаковы (см.рисунок), условные обозначения и индексы передаточных функций относятся к системе грубого регулирования, а в скобках – к системе точного регулирования.

Отметим, что возмущение, действующее на точную систему, с учетом выражения (4), принимается равным $x_1'\sqrt{1-r^2}$. Имея в виду это замечание и пренебрегая другими возмущениями, действующими на точную систему (ошибкой грубой системы, возмущениями, приложенными "между" точкой измерения температуры внутри барабана и выходной влажностью) по сравнению с ошибкой корреляции, можно проводить синтез только для одной из систем, но все его выводы распространить на обе. Искомая передаточная функция оптимального регулятора обозначена на рисунке W_{p1} для системы точного и W_{p2} для системы грубого регулирования.



Структурная схема системы

Целью синтеза является поиск некоторой эталонной структуры АСУ и установление ее параметров, которые могли бы отразить наилучшее возможное управление процессом. С этой точки зрения и для упрощения задачи не будем накладывать на управление никаких ограничений.

Чтобы найти значение W_{p1}, запишем выражение для ошибки этой системы через передаточные функции объекта и регулятора и подставим это выражение в интеграл (6). Получим

$$J_1 = \int_0^\infty y_1^2 dt = \frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\left[(1 - W_{12}W_3)W_{11}x_2'\right]\left[(1 - \bar{W}_{12}\bar{W}_3)\bar{W}_{11}\bar{x}_2'\right]dp\,, \qquad (8)$$

где x_2' – оставшееся возмущение, нескомпенсированное системой грубого регулирования; W_3 – передаточная функция эквивалентного управляющего устройства,

$$W_3 = \frac{W_{p1}}{1 + W_{p1}W_{12}}\,. \qquad (9)$$

Все $W_{ik} = W_{ik}(p)$, комплексную переменную p для упрощения записи опускаем; $\bar{W}_{ik} = W_{ik}(-p)$; $\bar{x}_2' = x_2'(-p)$.

Будем варьировать функционал (8), изменяя допустимые значения W_3. Необходимое условие минимума $\delta J_1 = 0$ приводит к уравнению типа Винера–Хопфа (записанному в частотной форме) для оптимальной передаточной функции W_3. Решая это уравнение методами, предложенными Ч.Шелдоном [7], приходим к следующему выражению

$$W_3 = \frac{1 + pT_{12}}{k_{12}}\left[1 + pT_{11}\left(1 - e^{-\frac{\tau_{12}}{T_{11}}}\right)\right]. \qquad (10)$$

Тогда для передаточной функции оптимального регулятора, согласно выражению (9), имеем

$$W_{p1} = \frac{W_3}{1 - W_{12}W_3} = \frac{1 + pT_{12}}{k_{12}\left[\dfrac{1}{1 + pT_{11}\left(1 - e^{-\tau_{12}/T_{11}}\right)} - e^{-p\tau_{12}}\right]}\,. \qquad (11)$$

Представив $e^{-p\tau_{12}}$ двумя членами ряда Падэ, т.е.

$$e^{-p\tau_{12}} \cong \frac{2 - p\tau_{12}}{2 + p\tau_{12}}\,,$$

после соответствующих алгебраических преобразований для W_{p1} получаем

$$W_{p1} = k_{p1}\left(1 + \frac{1}{p T_{и1}} + T_{п1} p\right) W_б \ , \qquad (12)$$

где k_{p1} – коэффициент усиления регулятора; $T_{и1}$ – время изодрома; $T_{п1}$ – время предварения (масштаб производной); $W_б$ – некоторая балластная передаточная функция, представляющая собой интегро-дифференцирующее звено,

$$k_{p1} = \frac{2T_{12} + \tau_{12}}{k_{12}\tau_{12}} \ ; \qquad T_{и1} = \frac{1}{T_{12} + \frac{1}{2}\tau_{12}} \ ; \qquad T_{п1} = \frac{T_{12}\tau_{12}}{2T_{12} + \tau_{12}} \ ;$$

$$W_б = \frac{1 + ap}{2\left(1 - \frac{a}{\tau_{12}}\right) + ap} \ ; \qquad a = T_{11}\left(1 - e^{-\tau_{12}/T_{11}}\right) .$$

Таким образом, оптимальный регулятор образуется из последовательного соединения стандартного ПИД-регулятора с интегро-дифференцирующим звеном. Передаточная функция оптимального регулятора системы грубого регулирования, как уже отмечалось, аналогична, и для определения численных настроек второго регулятора достаточно заменить значения постоянных в выражении (12). Полученный результат хорошо совпадает с выводами В.Г.Стафейчука [6], найденными несколько другим методом.

На основе выполненного аналитического синтеза была построена действующая модель АСУ, которая успешно прошла испытания и принята к внедрению на всех сушильных барабанах обогатительной фабрики Ковдорского ГОКа.

Литература

1. Автоматическое управление процессом сушки фосфоритового концентрата. – "Механизация и автоматизация производства", 1971, № 2. Авт.: Е.С.Крячевский, В.В.Стальский, Н.С.Сабадаш, А.В.Стороженко, С.В.Стороженко.

2. Летов А.М. Динамика полета и управления. М., "Наука", 1969.

3. Пугачёв В.С. Теория случайных функций и применение ее к задачам автоматического управления. М., Физматгиз, 1960.

4. Стальский В.В. Экспериментальные динамические характеристики процесса сушки фосфоритового концентрата. – "Зап. ЛГИ", т.56, вып. 1, Л., 1968.

5. Стальский В.В., Стороженко С.В. Электронное моделирование процесса сушки полезных ископаемых во вращающемся сушильном барабане. Известия вузов, "Горн.журн.", 1974, № 1.

6. Стафейчук В.Г. К вопросу о реализации оптимального линейного регулятора для объектов с запаздыванием. – В сб.: Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий, вып. 3. Изд. Челябинск. политех. ин-та, 1967.

7. Шелдон, Чанг. Синтез оптимальных систем автоматического управления. М., "Машиностроение", 1964.