Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LXII, вып. 1, 1972 г.

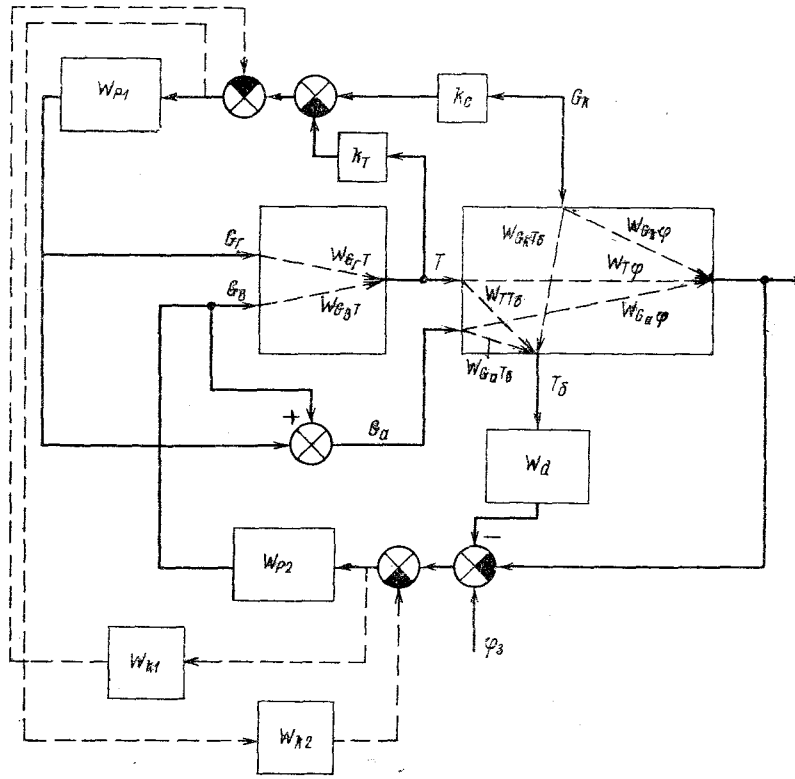
МНОГОСВЯЗНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ФОСФОРИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

В. В. Стальский, С. В. Стороженко

Процесс сушки фосфоритового концентрата во вращающемся сушильном барабане (длиной 20 *м*, внутренним диаметром 2,8 *м*) как объект автоматического управления подробно описан ранее [1]. Здесь отметим главное. Сушка концентрата происходит за счет сжигания газа в топке, в которую, кроме необходимого количестве газа $G_г$, подается воздух на горение и так называемый вторичный воздух $G_в$, идущий на создание сушильного агента. Сырой концентрат (кек) движется по барабану в ту же сторону (прямоток), что и сушильный агент. Система автоматического управления (САУ) на этом объекте должна обеспечить стабилизацию влажности концентрата φ на выходе барабана в соответствии с заданием $\varphi_з$. Основными возмущающими воздействиями процесса являются нагрузка — расход кека $G_к$ — и его влажность. Большие запаздывания не только по каналу основного возмущения $C_к$ —φ, но и по главному управляющему воздействию $G_г$ —φ приводят к необходимости использовать еще и другое управляющее воздействие — вторичный воздух. Если при изменении расхода газа и изменении температуры в топке T или, что то же, температуры сушильного агента на входе в барабан, влажность концентрата начинает изменяться только через большой промежуток времени, то воздействие изменением количества сушильного агента действует, практически, сразу. Однако преодоление транспортного запаздывания остается одной из основных задач синтеза САУ. Это объясняется малой эффективностью управляющего воздействия $G_в$ и большим (15—18 мин.) запаздыванием основного управляющего воздействия. Для преодоления запаздывания целесообразно применять «исчезающий» импульс по косвенному параметру — температуре внутри барабана $T_б$, которая снимается с термопары, установленной на 8-м метре от горячего конца барабана. Этот параметр хорошо коррелирует с влажностью концентрата на выходе барабана [2]. Так, по нашим исследованиям для рассматриваемого объекта коэффициент корреляции составляет 0,91. Ценность этого параметра в том, что он имеет примерно втрое меньшее запаздывание по сравнению с влажностью концентрата.

На основании изложенного рационально компенсировать изменение $G_к$ изменением T с помощью отдельной цепи воздействия с обратной связью по температуре в топке. Целесообразно также использовать

менее эффективный, но более быстродействующий параметр $G_в$ вместе с исчезающим импульсом для создания второй цепи стабилизации. Эти рассуждения приводят к структурной схеме САУ, последовательность управляющих воздействий в которой аналогична последовательности воздействий при ручном управлении.



Структурная схема многосвязной системы автоматического управления процессом сушки фосфоритового концентрата

Как видно из структурно-функциональной схемы, полученная многоконтурная САУ очень сложна и для реализации нуждается в тщательном анализе. Это должно быть математическое описание САУ процессом сушки с целью выбора необходимых корректирующих устройств, обеспечивающих динамические качества системы, т. е. в конечном счете ее работоспособность.

Анализ САУ для введения корректирующих звеньев и обеспечение тем самым улучшения динамических качеств системы является задачей настоящей работы.

Поскольку объект управления очень сложен, введем некоторые упрощения. Будем считать объект и регулятор линейными. Отвлечемся от распределенности параметров объекта и аппроксимируем передаточные функции (см. рисунок) по всем каналам типовыми элементарными звеньями первого порядка с запаздыванием или без него.

С учетом этих упрощений уравнения САУ, представленные через передаточные функции отдельных звеньев, будут иметь вид

$$\varphi = W_{G_к\varphi} G_к + W_{T\varphi} T + W_{G_а\varphi} (G_г + G_в); \quad (1)$$

$$T = W_{G_гT} G_г + W_{G_вT} G_в; \quad (2)$$

$$G_г = W_{р1} [k_G G_к - k_T T]; \quad (3)$$

$$G_в = W_{р2} (\varphi_з - \varphi) - W_{р2} W_d [W_{G_кT_б} G_к + W_{TT_б} T + W_{G_а} (G_г + G_в)], \quad (4)$$

где $W_{ik} = W_{ik}(p)$ — передаточные функции звеньев системы по каналам i (вход) — k (выход). Знак переменной преобразования Лапласа p здесь и ниже для краткости опущен.

Кроме того, примем для суммарного значения расхода газа и первичного воздуха в заданном соотношении обозначение $G_г$, а $G_г + G_в = G_а$, где $G_а$ — количество сушильного агента.

Подставив $G_г$ и $G_в$ из формул (3), (4) в выражения (1), (2) и выполнив необходимые преобразования, получаем

$$[(1 + W_{р2} W_d W_{G_аT_б} + W_{G_а\varphi} W_{р2})] \varphi = W_{G_а\varphi} W_{р2} \varphi_з + [(W_{G_к\varphi} + W_{G_а\varphi} W_{р1} k_G)(1 + W_{р2} W_d W_{G_аT_б}) - W_{G_а\varphi} W_{р2} W_d (W_{G_кT_б} + W_{G_аT_б} \times W_{р1} k_G)] G_к + [W_{T\varphi} - W_{G_а\varphi} W_{р1} k_T + W_{р2} W_d (W_{T\varphi} W_{G_аT_б} - W_{G_а\varphi} W_{TT_б}]; \quad (5)$$

$$[(1 + W_{р2} W_d W_{G_аT_б})(1 + W_{G_бT} W_{р1} k_T) + W_{G_вT} W_{р2} W_d (W_{TT_б} - W_{G_аT_б} W_{р1} k_T) T = [k_G W_{G_гT} W_{р1} (1 + W_{р2} W_d W_{G_аT_б}) - W_{G_вT} W_d W_{р2} (W_{G_кT_в} - W_{G_аT_б} W_{р1} k_G)] G_к + W_{G_вT} W_{р2} \varphi_з - W_{G_вT} W_{р2} \varphi. \quad (6)$$

Из этих выражений видно, что система описывается громоздкими уравнениями, а передаточные функции входят в выражение иногда со знаком минус, что дает основание предполагать возможные затруднения с обеспечением устойчивости САУ.

Кроме главного регулируемого параметра влажности концентрата, стабилизация которого является целью функционирования системы, в САУ есть еще один регулируемый параметр — температура в топке. Примем условно, что у нас два равноценных, в некотором смысле, регулируемых параметра: T и φ. Будем рассматривать САУ как многосвязную с двумя регулируемыми и двумя регулирующими воздействиями. Считаем, таким образом, рассматриваемую САУ состоящей из двух частей, взаимное влияние которых должно быть исключено. Первая часть — это регулирование температуры сушильного агента T посредством регулятора $W_{р1}$ — регулирующее воздействие $G_г$, вторая — регулирование собственно влажности φ посредством регулятора $W_{р2}$ — регулирующее воздействие $G_в$. Каждое из регулирующих воздействий связано с обоими регулируемыми параметрами и, кроме того, одна из регулируемых величин действует на другую: T на φ (но не обратно), так как обе части объекта (топка и собственно барабан) связаны между собой последовательно.

Используем классический метод анализа многосвязных систем, которым можно добиться независимости влияния определенных воздействий одной из частей многосвязной САУ на другую. Поскольку прежде всего следует заботиться о стабилизации влажности концентрата на выходе барабана, целесообразно предусмотреть подачу холодного вторичного

воздуха в топку, чтобы температура сушильного агента при изменении его количества (с точки зрения статики процесса) не изменилась. Однако при этом следует разгрузить регулятор температуры в топке (передаточная функция W_{p1}) от возмущающих воздействий второй части системы (передаточная функция регулятора W_{p2}), как и действие первой части системы на регулятор второй. Это, очевидно, обеспечит достижение автономии обеих частей САУ, устойчивость всей САУ и возможность улучшения качества регулирования. Необходимые корректирующие элементы — компенсаторы, или «развязки», показаны пунктиром на схеме.

Введем еще некоторые упрощения. Поскольку, как указано выше, косвенный параметр $T_б$ достаточно хорошо отражает значение основного регулируемого параметра φ, но с меньшим запаздыванием, представим участок барабана $T_б$—φ одной передаточной функцией $W_{T_б\varphi}$, представляющей собой звено чистого запаздывания, умноженной на передаточный коэффициент. При этом передаточные функции $W_{G_kT_б}$; $W_{TT_б}$; $W_{G_aT_б}$ замещаются соответственно передаточными функциями $W^{\circ}_{G_кTT_б}$; $W^{\circ}_{TT_б}$; $W^{\circ}_{G_aT_б}$.

С учетом всех допущений составим уравнения системы и выведем передаточные функции компенсаторов $W_{к1}$ и $W_{к2}$, делающих обе части САУ автономными. $W_{к1}$ и $W_{к2}$ на схеме показаны пунктиром. Для первой части системы имеем

$$T = W_{G_гT}G_г + W_{G_вT}G_в. \tag{7}$$

Выведем условия, при которых влияние второго регулятора на регулируемый параметр T, осуществляющееся по каналу $G_в - T$, будет исключено. Для этого из уравнения (7) исключим первое регулирующее воздействие $G_г$. Согласно прилагаемой схеме, с учетом компенсаторов $W_{к1}$ и $W_{к2}$,

$$G_г = k_G\, W_{р1}G_к - k_T W_{р1}T - \frac{W_{к1}}{W_{р2}}\, W_{р1}G_в. \tag{8}$$

Подставив это выражение в уравнение (7), получаем

$$T = \frac{k_G W_{G_гT}W_{р1}}{1 + W_{G_гT}W_{р1}k_T}\, G_к + \frac{W_{G_вT}W_{р2} - W_{G_гT}W_{р1}W_{к1}}{W_{р2}\,(1 + W_{G_гT}W_{р1}k_T)}\, G_в$$

или

$$T = \frac{k_G W_{G_гT}W_{р1}}{1 + W_{G_гT}W_{р1}k_T}\, G_к + \frac{W_{G_гT}W_{р1}}{1 + W_{G_гT}W_{р1}k_T}\left(\frac{W_{G_вT}}{W_{G_гT}W_{р2}} - \frac{W_{к1}}{W_{р1}}\right) G_в. \tag{9}$$

Условие автономности, т. е. независимости T от $G_в$, будет выполнено, если

$$W_ф = \frac{W_{G_вT}}{W_{G_гT}W_{р1}} - \frac{W_{к1}}{W_{р2}} = 0,$$

где $W_ф$ — передаточная функция фильтра, через который проходит второе регулирующее воздействие. Отсюда

$$W_{к1} = \frac{W_{G_вT}W_{р2}}{W_{G_гT}W_{р1}}. \tag{10}$$

При соблюдении этого условия уравнение (9) примет вид

$$(1 + W_{G_гT}W_{р1}k_T)\, T = W_{G_гT}W_{р1}G_к. \tag{11}$$

Для второй части системы

$$\varphi = W_{T_б\varphi}[W^0_{G_кT_б}G_к + (W^0_{TT_б}W^0_{G_гT} + W^0_{G_аT_б})G_г + \\ + (W^0_{TT_б}W_{G_вT} + W_{G_аT_б})G_в], \qquad (12)$$

где

$$G_в = W_{р2}[\varphi_з - \varphi\left(1 + \frac{W_d}{W_{T_б}}\right) - \frac{W_{к2}}{W_{р1}}]G_г. \qquad (13)$$

Подставим это выражение в уравнение (12) и после известных преобразований получаем

$$\varphi = \frac{W_{T_б\varphi}W^\circ_{G_кT_б}}{[1 + W_{р2}(W^0_{G_аT_б} + W^0_{TT_б}W_{G_вT})(W_{T_б\varphi} + W_d)]}G_к + \\ + \frac{W_{р2}W_{T_б\varphi}(W^0_{G_аT_б} + W^0_{TT_б}W_{G_вT})}{[1 + W_{р2}(W^0_{G_аT_б} + W^0_{TT_б}W_{G_вT})(W_{T_б\varphi} + W_d)]}\varphi_з + \\ + \frac{W_{р2}W_{T_б\varphi}(W^\circ_{G_вT}W^0_{TT_б} + W^0_{G_аT_б})}{[1 + W_{р2}(W^0_{G_аT_б} + W^0_{TT_б}W_{G_вT})(W_{T_б\varphi} + W_d)]} \times \\ \times\left[\frac{W^0_{G_аT_б} + W^0_{TT_б}W_{G_гT}}{W_{р2}(W^0_{G_аT_б} + W^0_{TT_б}W_{G_вT})} - \frac{W_{к2}}{W_{р1}}\right]G_г. \qquad (14)$$

Аналогично для автономности второй части системы необходимо, чтобы

$$W_{к2} = \frac{W_{р1}(W^0_{G_аT_б} + W^0_{TT_б}W_{G_гT})}{W_{р2}(W^0_{G_аT_б} + W^0_{TT_б}W_{G_вT})}. \qquad (15)$$

С учетом этого уравнение (14) принимает вид

$$[1 + W_{р2}(W^0_{G_аT_б} + W^0_{TT_б}W_{G_вT})(W_{T_б\varphi} + W_d)]\varphi = W_{T_б\varphi}W_{G_кT_б}G_к + \\ + W_{р2}W_{T_б\varphi}(W^0_{G_аT_б} + W^0_{TT_б}W_{G_вT})\varphi_з. \qquad (16)$$

В уравнениях (11), (16) переменные не связаны между собой. Фактически мы имеем две одноконтурные САУ, обеспечение устойчивости и качества регулирования в которых определяется настройками стандартных регуляторов. Оптимальные настройки регуляторов получаем известными методами.

Обратимся к расчету компенсаторов, определяемых передаточными функциями (10) и (15). Подставим их значения в развернутом виде. Тогда для первого компенсатора получаем, в соответствии с формулой (11),

$$W_{к1} = \frac{\dfrac{k_{G_вT}}{1 + pT_{G_вT}} \cdot \dfrac{k_2(1 + pT_{u2})}{pT_{u2}}}{\dfrac{k_{G_гT}}{1 + pT_{G_гT}} \cdot \dfrac{k_1(1 + pT_{u1})}{pT_{u1}}} = k_0\frac{(1 + pT_{G_гT})(1 + pT_{u2})}{(1 + pT_{u1})(1 + pT_{G_вT})}, \qquad (17)$$

где

$$k_0 = \frac{k_{G_вT}k_2T_{u1}}{k_{G_гT}k_1T_{u2}}.$$

В этой системе использованы изодромные регуляторы: $T_{и1}$; $T_{и2}$ — время изодрома соответственно первого и второго регуляторов.

Для второго компенсатора

$$W_{к2} = \frac{k_1(1+pT_{и1})\,T_{и2}}{T_{и1}k_2(1+pT_{и2})} \cdot \frac{\left[\dfrac{k^0_{GaTб}}{1+pT^0_{GaTб}} + \dfrac{k^0_{TTб}\exp(-p\tau_{TTб})}{1+pT^0_{TTб}} \cdot \dfrac{k_{GгT}}{1+pT_{GгT}}\right]}{\left[\dfrac{k^0_{GaTб}}{1+pT^0_{GaTб}} + \dfrac{k^0_{TTб}\exp(-p\tau_{TTб})}{1+pT^0_{TTб}} \cdot \dfrac{k_{GвT}}{1+pT_{GвT}}\right]} =$$

$$= k' \frac{(1+pT_{и1})(1+pT_{GвT})}{(1+pT_{GгT})(1+pT_{и2})} \times$$

$$\times \frac{[(1+pT_{TTб})(1+pT_{GкT}) + k_{01}\exp(-p\tau_{TTб})(1+pT_{GaTб})]}{[(1+pT_{TTб})(1+pT_{GвT}) + k_{01}\exp(-p\tau_{TTб})(1+pT_{GaTб})]}, \qquad (18)$$

где

$$k' = \frac{k_1T_{и2}}{k_2T_{и1}}; \quad k_{01} = \frac{k^0_{TTб}k_{GгT}}{k^0_{GaTб}}; \quad k_{02} = \frac{k^0_{TaTб}k_{GвT}}{k_{GaTб}}.$$

Передаточные функции компенсаторов вида (17), (18) можно аппроксимировать передаточной функцией простейшего интегродифференцирующего типового звена, которое, как известно, при электрической (электронной) регулирующей аппаратуре САУ проще реализуется в виде *RC*-цепей.

Подставив в выражения (17) и (18) численные значения, получаем

$$W_{к1} = \frac{0{,}02 \cdot 4 \cdot 3{,}5}{0{,}3 \cdot 3 \cdot 0{,}7} \cdot \frac{(1+10p)(1+0{,}7p)}{(1+5p)(1+3{,}5p)};$$

$$W_{к2} = \frac{3 \cdot 0{,}7}{4 \cdot 3{,}5} \cdot \frac{(1+3{,}5p)(1+5p)}{(1+10p)(1+0{,}7p)} \times$$

$$\times \frac{[(1+7p)(1+10p) + \dfrac{0{,}36 \cdot 0{,}3}{0{,}25} e^{-12p}(1+5p)]}{(1+7p)(1+5p) + \dfrac{0{,}36 \cdot 0{,}02}{0{,}25} e^{-12p}(1+5p)}.$$

Цифровые данные получены на объекте серией специальных экспериментов [1]. Разложив $e^{-p\tau}$ в ряд Маклорена, ограничимся двумя членами ряда. Методом аппроксимации [4] получим окончательно

$$W_{к1} = 0{,}44\,\frac{1+10p}{1+7{,}8p}; \qquad (19)$$

$$W_{к2} = 0{,}15\,\frac{1+3{,}8p}{1+0{,}8p}. \qquad (20)$$

Действующий макет описанной САУ [5] успешно прошел испытания на кингисеппском комбинате «Фосфорит». В настоящее время система монтируется на четырех сушильных барабанах обогатительной фабрики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стальский В. В. Экспериментальные динамические характеристики процесса сушки фосфоритового концентрата. Зап. ЛГИ, 1968, т. LVI, вып. 1.

2. Мезин И. С., Малый А. А. Автоматизация сушильных барабанов. Сб. «Автоматизация производственных процессов». АН СССР, 1958.

3. Калмычков В. П. О выборе схем автономного регулирования с учетом обеспечения требуемого качества переходных процессов в регулируемых объектах. АиТ, 1963, № 2.

4. Смольников П. В. Типовой компенсатор возмущения (типовая связь по возмущению) для комбинированных систем автоматического регулирования. Автоматизация химических производств, 1964, № 2.

5. Сабадаш Н. С. и др. Способ автоматического регулирования процесса сушки. Бюлл. изобр. 1970, № 12, № 267490.