Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVI, вып. 1, 1968 г.

УДК 62—503.1

ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ (САУ) ПРОЦЕССОМ СУШКИ ФОСФОРИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

С. В. Стороженко

Сушка фосфоритового концентрата осуществляется во вращающемся сушильном барабане, на выходе которого должен быть получен концентрат заданной влажности: повышенная влажность концентрата недопустима по технологическим условиям, пересушка влечет перерасход топлива, потери на распыление. Поэтому задача автоматического управления процессом сушки особенно актуальна для обогатительной промышленности.

Как объект автоматического управления процесс сушки весьма сложен. На него влияют многочисленные возмущающие воздействия, часть из которых (например, неорганизованные подсосы воздуха) неконтролируема.

По многим каналам «вход — выход» сушильный барабан, как всякий тепловой объект, характеризуется большими постоянными времени, а также значительными транспортными запаздываниями, что связано со сравнительно медленным перемещением материала внутри барабана и наличием транспортных трактов на входе и выходе его.

Далее для простоты объект предполагается линейным, учитываются только основные воздействия на него, распределенность его параметров для первого варианта рассматриваемой САУ не учитывается, т. е. объект аппроксимируется по каждому из каналов «вход — выход» сосредоточенным звеном с чистым запаздыванием. Передаточная функция такого звена может быть представлена в виде:

$$W_{об_i}(p) = W'_{об_i}(p)\, e^{-p\tau_i} = \frac{K_i}{N_i(p)}\, e^{-p\tau_i}, \qquad (1)$$

где τ_i — время запаздывания; K_i — коэффициент усиления; $N_i(p)$ — полином от p; i — номер канала «вход — выход» объекта регулирования.

Основными возмущающими воздействиями на процесс сушки следует считать изменения количества поступающего в барабан материала (кека) $G_м$ и его влажности φ_0. Расход топлива Θ_0 можно выбрать в качестве управляющего воздействия. Регулируемым параметром системы является влажность фосфоритового концентрата на выходе сушильного барабана $\varphi_к$. По технологическому заданию этот параметр должен быть стабилизирован в пределах $(1{,}3 \pm 0{,}2)\%$.

Несмотря на принятые нами упрощения, объект остается сложным для управления, так как по выбранным каналам имеет столь значительные запаздывания, что осуществить обычное управление по отклонению выходного параметра практически не представляется возможным. Это может быть показано следующим образом.

Воспользуемся соотношением для предельного значения запаздывания по управляющему воздействию τ_a, при котором системы автоматического

регулирования САР, работающие по отклонению, еще применимы [Купфмюллер, 1960; Шапировский, Иванов, Лисовский, 1965]:

$$\sum_{i=1}^{n-1} K_i \Theta_i \prod_{j=1}^{m} T_{ij} \sum_{j=1}^{m} \prod_{\substack{\lambda=1 \\ \lambda \neq j}}^{m} \left(\frac{1}{T_{i\lambda}} - \frac{1}{T_{ij}} \right) e^{-\frac{\tau_u^*}{T_{ij}}} \geqslant \sum K_i \Theta_i - x^*, \qquad (2)$$

где K_i — коэффициент усиления объекта по i-му возмущающему воздействию; Θ_i — возмущающее воздействие; T_{ij} — постоянная времени объекта по i-му возмущающему воздействию, действующему по j-му каналу (в нашем случае $T_{ij} = 0$ при $i \neq j$; $T_{ij} = T_i \neq 0$ при $i = j$); $n - 1$ — количество возмущений; τ_u^* — предельное значение запаздывания по управляющему воздействию; x^* — допустимое отклонение выходной величины.

Соотношение (2) справедливо для объектов, характеризующихся уравнением вида:

$$X(p) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{K_i}{N_i(p)} e^{-p\tau_i} f_i(p) + \frac{K_u}{N_u(p)} e^{-p\tau_u} U(p), \qquad (3)$$

где $X(p)$, $f_i(p)$, $U(p)$ — изображения соответственно регулируемой координаты, возмущающего и управляющего воздействий; τ_u — запаздывание по управляющему воздействию; K_u — коэффициент усиления объекта по управляющему воздействию; $N_i(p)$, $N_u(p)$ — полиномы степени m_i и r.

В качестве регулятора принят идеальный пропорциональный регулятор с коэффициентом усиления, равным бесконечности, и бесконечной скоростью сервомотора. Возмущающие функции $f_i(t)$ считаются непрерывными и однозначными, удовлетворяющими условиям:

$$f_i(t) = 0; \quad t < 0; \quad f_i(t) = \Theta_i; \quad t \geqslant 0.$$

Устойчивость системы не рассматривалась, но считалась обеспеченной. Считая, что известны границы отношений $\frac{\tau_u}{T_i}$ $\left(\frac{\tau_u}{T_{ij}} = \frac{1}{2} \div 1\right)$ и допустимое отклонение выходного параметра $\varphi_k^* = 0{,}2\%$, воспользуемся соотношением (2) для определения предельной суммарной величины возмущений, которую САР по отклонению $\varphi_k(t)$ еще может отработать, удовлетворяя заданной точности.

В соответствии с (1) рассматриваемый объект может быть представлен уравнением:

$$\varphi_k(p) = \frac{K_1}{1 + pT_1} e^{-p\tau_1} \varphi_0(p) + \frac{K_2}{1 + pT_2} e^{-p\tau_2} G_м(p) - \frac{K_u}{N(p)} e^{-p\tau_u} \Theta_0(p). \qquad (4)$$

С учетом всех выше указанных условий

$$\varphi_k(t) = L^{-1} \left[\frac{K_1}{1 + pT_1} e^{-p\tau_1} \frac{\varphi_0}{p} + \frac{K_2}{1 + pT_2} e^{-p\tau_2} \frac{G_м}{p} \right].$$

Тогда переходный процесс, вызванный только возмущающими воздействиями на интервале $0 \leqslant t \leqslant \tau_i + \tau_u$ имеет вид:

$$\varphi_k(t) = K_1 \varphi_0(t) \left[1 - e^{-\frac{(t-\tau_1)}{T_1}} \right] + K_2 G_м(t) \left[1 - e^{-\frac{(t-\tau_2)}{T_2}} \right].$$

Максимальное значение $\varphi_k(t)$:

$$\varphi_{k_{\max}} = K_1 \varphi_0 \left(1 - e^{-\frac{\tau_u}{T_1}} \right) + K_2 G_м \left(1 - e^{-\frac{\tau_u}{T_2}} \right).$$

Поскольку требуется, чтобы максимальное отклонение регулируемого параметра было меньше предельно допустимого, т. е. $|\varphi_{k_{\max}}| \leqslant \varphi_k^*$,

$$\varphi_k^* \geqslant K_1 \varphi_0 \left(1 - e^{-\frac{\tau_u}{T_1}} \right) + K_2 G_м \left(1 - e^{-\frac{\tau_u}{T_2}} \right). \qquad (5)$$

Найдем количественные соотношения для наиболее легкого случая, когда $\frac{\tau_и}{T_i}$ минимально, т. е. $\frac{\tau_и}{T_1} = \frac{\tau_и}{T_2} = \frac{1}{2}$. Все отклонения приведем к безразмерным величинам, поделив их на соответствующие средние значения, и рассмотрим случай, когда $K_1 = K_2$, обозначив это общее значение коэффициентов усиления через K.

Тогда получим

$$\frac{\varphi_k^*}{\varphi_{k_{ср}}} \geqslant K\left(1 - e^{-\frac{1}{2}}\right)\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_{0_{ср}}} + \frac{G_м}{G_{м_{ср}}}\right).$$

Если суммарная величина возмущений

$$\frac{\varphi_0}{\varphi_{0_{ср}}} + \frac{G_м}{G_{м_{ср}}} = A,$$

а $\frac{\varphi_k^*}{\varphi_{k_{ср}}} = \frac{0{,}2\%}{1{,}3\%} \approx 0{,}15$, то предельное значение величины возмущений запишется в виде:

$$A_{пред} = \frac{1}{K} 0{,}15 \cdot 2{,}5 = \frac{1}{K} 0{,}38,$$

$$A \leqslant A_{пред}. \qquad (6)$$

Известно, что начальная влажность материала колеблется в пределах $(16 \pm 3)\%$, расход поступающего материала — (20 ± 5) *т/ч* ($\varphi_0 = \pm 3\%$; $G_м = \pm 5$ *т/ч*). Тогда

$$A \cong \frac{1}{K}\left(\frac{3}{16} + \frac{5}{20}\right) \cong \frac{1}{K} 0{,}44, \qquad (7)$$

т. е. реальные величины возмущений много больше предельно допустимых при наиболее легких условиях: $\frac{\tau_и}{T_i} = \min$ (с учетом только двух основных возмущений). Следовательно, для решения поставленной задачи требуется построить систему, инвариантную от возмущающих воздействий. Поскольку невозможно контролировать все действующие возмущения, то это может быть только комбинированная система управления, инвариантная относительно основных возмущений $\varphi_0(t)$ и $G_м(t)$.

В такой системе роль замкнутого контура регулирования сводится лишь к окончательной коррекции процесса регулирования, т. е. к ликвидации оставшихся отклонений $\varphi_k(t)$, вызванных неточностью измерений, компенсации $\varphi_0(t)$ и $G_м t$ и действием помех. При этом очевидно, что для удовлетворительного качества процесса регулирования максимальное отклонение, вызванное всеми оставшимися нескомпенсированными возмущениями, должно отвечать условию (6). Уравнение комбинированной системы в соответствии со структурной схемой (рис. 1а) будет:

$$\varphi_k(p) = \frac{W_{об_1}(p) - W_{об_и}(p)\, W_p(p)\, W_{1k}(p)}{1 + W_{об_и}(p)\, W_p(p)}\, \varphi_0(p) +$$

$$+ \frac{W_{об_2}(p) - W_{об_и}(p)\, W_p(p)\, W_{2k}(p)}{1 + W_{об_и}(p)\, W_p(p)}\, G_м(p) + \frac{W_{об_и}(p)\, W_p(p)}{1 + W_{об_и}(p)\, W_p(p)}\, \Theta_0(p), \qquad (8)$$

где $W_{об_и}(p)$, $W_{об_1}(p)$, $W_{об_2}(p)$ — передаточные функции объекта по каналам управления и возмущений; $W_p(p)$ — передаточная функция регулятора; $W_{1k}(p)$, $W_{2k}(p)$ — передаточные функции компенсаторов возмущений. Обозначим:

$$\frac{W_{об_и}(p)\, W_p(p)}{1 + W_{об_и}(p)\, W_p(p)} = W_у(p),$$

тогда

$$\varphi_k(p) = W_у(p)\,W_1(p)\,\varphi_0(p) + W_у(p)\,W_2(p)\,G_м(p) + W_у(p)\,\Theta_0(p). \qquad (9)$$

Условия абсолютной инвариантности $\varphi_k(p)$ от возмущений $\varphi_0(p)$ и $G_м(p)$ могут быть записаны:

$$W_1(p) = \frac{W_{об_1}(p)}{W_p(p)\,W_{об_и}(p)} - W_{1k}(p) = 0,$$

$$W_2(p) = \frac{W_{об_2}(p)}{W_p(p)\,W_{об_и}(p)} - W_{2k}(p) = 0. \qquad (10)$$

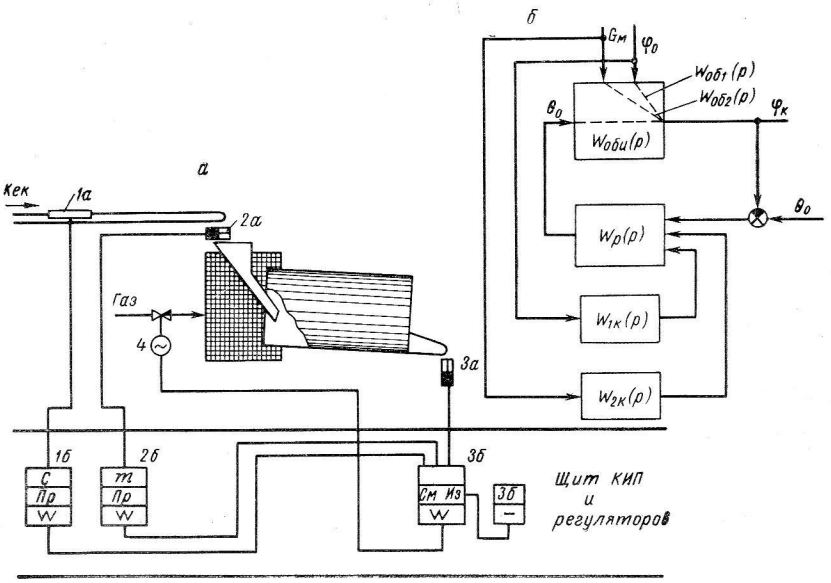


Рис. 1. Комбинированная САУ процессом сушки фосфоритового концентрата (вариант I): *а* — приборная реализация САУ; *б* — структурная схема системы.

1а — датчик веса поступающего материала (кека); *2а*, *3а* — датчики влажности кека и фосмуки; *1б*, *2б* — компенсаторы изменения веса и влажности кека; *3б* — регулятор, работающий по отклонению влажности фосмуки; *4* — исполнительный механизм.

Отсюда следует, что передаточные функции для компенсаторов должны иметь вид:

$$W_{1k}(p) = \frac{K_1 W^0_{об_1}(p)}{K W^0_{об_и}(p)} \cdot \frac{1}{W_p(p)}, \qquad (11)$$

$$W_{2k}(p) = \frac{K_2 W^0_{об_2}(p)}{K W^0_{об_и}(p)} \cdot \frac{1}{W_p(p)}, \qquad (12)$$

где $W^0_{об}$ — передаточные функции объекта с коэффициентом усиления, равным 1.

Легко показать, что условия инвариантности [Смольников, 1964] не зависят от $\frac{K_i}{K}$, $\frac{1}{W_p(p)}$, а следовательно, и от параметров настройки регулятора и определяются только отношением:

$$\frac{W^0_{об_i}(p)}{W^0_{об_и}(p)}.$$

Учитывая (1), это отношение можно представить в виде:

$$\frac{W^0_{об_i}(p)}{W^0_{об_и}(p)} = \frac{W^{01}_{об_i}(p)}{W^{01}_{об_и}(p)}\, e^{-p(\tau_i - \tau_и)}, \qquad (13)$$

где $W^{01}_{об}(p)$ — передаточные функции объекта с коэффициентом усиления, равным 1, и без учета запаздывания.

Как правило, технически реализовать передаточные функции (11), (12) трудно, а иногда и вообще невозможно из-за сложности $W^0_{об_i}(p)$ и $W^0_{об_u}(p)$. В частности, при $\tau_i - \tau_u < 0$, передаточные функции компенсаторов (11), (12) за счет сомножителей (13) имеют полюсы в правой полуплоскости, т. е. нарушаются условия устойчивости всей системы. Поэтому при определении передаточной функции и расчете оптимальных значений параметров реальных компенсаторов приходится исходить из условия максимально возможного приближения к абсолютной инвариантности. Следовательно, нужно установить вид $\frac{W^0_{об_i}(p)}{W^0_{об_u}(p)}$ и подобрать наиболее простое выражение $\frac{W^\nu_{об_i}(p)}{W^\nu_{об_u}(p)}$, являющееся его приближением, где ν — степень инвариантности.

Как и для большинства тепловых объектов функция $\frac{W^0_{об_i}(p)}{W^0_{об_u}(p)}$ для данного объекта может быть представлена в виде:

$$\frac{W^0_{об_i}(p)}{W^0_{об_u}(p)} = \frac{(1+pT_1)(1+pT_2)\ldots(1+pT_n)}{(1+pT'_1)(1+pT'_2)\ldots(1+pT'_n)}, \qquad (14)$$

где $e^{-p(\tau_i-\tau_u)}$ учтено повышением порядка выражения (14) [Смольников, 1964]. Простейшим звеном, способным приближенно воспроизвести функцию (14), является звено с передаточной функцией вида:

$$\frac{W^\nu_{об_i}(p)}{W^\nu_{об_u}(p)} = \frac{1+pT_{1K}}{1+pT_{2K}}, \qquad (15)$$

где T_{1K} и T_{2K} — значения параметров компенсатора, при которых осуществляется наилучшее из возможных приближений к условиям абсолютной инвариантности.

С учетом (15) передаточные функции компенсаторов (11), (12) могут быть записаны:

$$W_{1K}(p) = K' \frac{1+pT'_{1K}}{1+pT'_{2K}} \frac{1}{W_p(p)};$$

$$W_{2K}(p) = K'' \frac{1+pT''_{1K}}{1+pT''_{2K}} \frac{1}{W_p(p)}.$$

Окончательная структурная схема компенсаторов определяется типом выбранного регулятора.

При сложной $W_p(p)$ для упрощения передаточных функций $W_{1K}(p)$, $W_{2K}(p)$ структурную схему системы целесообразно изменить, осуществляя суммирование сигналов после регулятора.

По найденным величинам T_{1K}, T_{2K} можно оценить ν.

Приборная реализация рассмотренного варианта структурной схемы представлена на рис. *1б*.

Для этой схемы условно приняты электрические приборы, компенсаторы и автоматические регуляторы, так как практически на реальном объекте схему легче реализовать именно на этой аппаратуре (например, аппаратуре ЭАУС). Компенсаторами *1б*, *2б* (рис. 1б) могут быть после соответствующей переделки регуляторы типа РП-1. В качестве основного регулятора *3б*, осуществляющего суммирование сигналов и изодромный закон регулирования, могут быть использованы регуляторы типа РПИК-Т или РП-1.

Однако может оказаться, что из-за значительных величин неконтролируемых возмущений и больших запаздываний в объекте контур регулирования по отклонению не справится с задачей коррекции в САУ. Это означает, что аппроксимация объекта в виде сосредоточенного звена с запаздыванием не может быть принята и необходимо учесть реальную распределенность процесса.

Представление объекта как распределенного требует введения и распределенного контроля, учитывающего состояние процесса по длине аппарата. Построим комбинированную систему автоматического управления, в которой постоянство влажности выходного концентрата будет поддерживаться с учетом распределенного характера рассматриваемого процесса [Девятов, 1963; Девятов, Гимельштейн, Хорькова, 1963].

Контроль параметра хотя бы в одной промежуточной точке и на выходе можно рассматривать

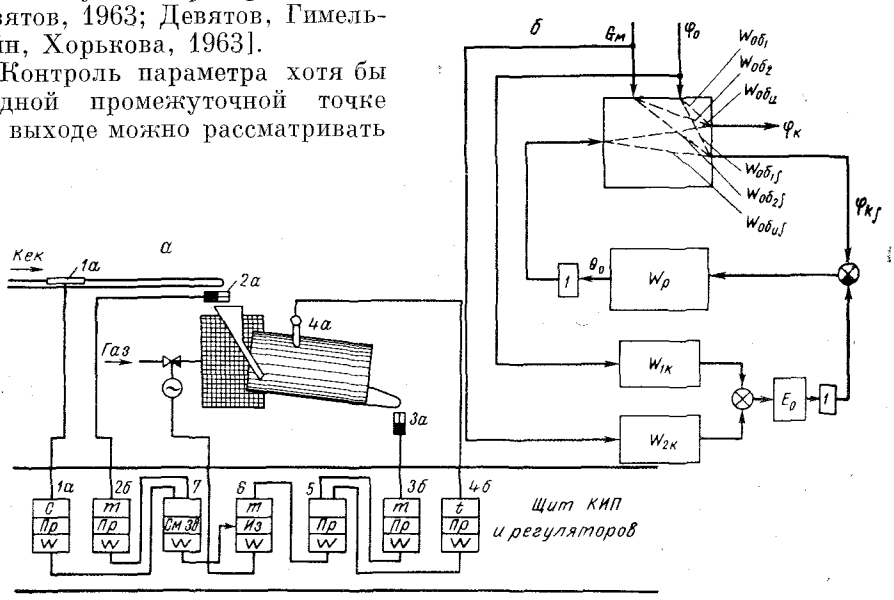


Рис. 2. Комбинированная САУ, использующая принцип распределенного контроля (вариант II): *а* — структурная схема системы; б — приборная реализация:

4а — датчик температуры внутри барабана; *3б*, *4б*, *5* — преобразователи регулируемой величины; *6* — регулятор; *7* — формирователь задающего воздействия (*1а*, *2а*, *3а* — то же, что и на рис. 1).

как частный случай неравномерно распределенного контроля с весовой функцией $f(X)$.

Известно, что косвенным параметром, хорошо отражающим величину влажности выходного концентрата $\varphi_к$, может быть принята температура в одной точке внутри барабана [Мезин, Малый, 1958]. Постоянство $\varphi_к$ можно поддерживать за счет контроля «весовой среднеинтегральной влажности $\varphi_{к\int}$», равной:

$$\varphi_{к\int} = \int_{X_1}^{l} \varphi_к(p, X)\,[r\delta(X - X_1) + (1 - r)\,\delta(X - l)]\,dX,$$

$$0 \leqslant r \leqslant 1,$$

$$r\delta(X - X_1) + (1 - r)\,\delta(X - l) = f(X), \qquad (16)$$

где $\varphi_к(p, X)$ — изображение регулируемого параметра в каждой точке по длине аппарата; X_1 — координата расположения точки измерения температуры внутри барабана (находится экспериментальным путем); l — координата конечной точки барабана, в которой осуществляется автоматический контроль влажности.

Значение $\varphi_{к\int}$ должно непрерывно изменяться в соответствии с входными возмущениями [Девятов, 1963].

Структурная схема такой системы представлена на рис. 2, *а*.

Уравнения системы в операторной форме:

$$\varphi_{к\int} = W_{об_1\int}\varphi_0 + W_{об_2\int}G_м - W_{об_u\int}\Theta, \tag{17}$$

$$\Theta = -W_p(\varphi_{к\int} - \varepsilon), \tag{18}$$

$$\varepsilon = E_0(W_{к_1}\varphi_0 + W_{к_2}G_м), \tag{19}$$

где

$$\left.\begin{aligned} W_{об_1\int} &= \frac{1}{l - X_1}\int_{X_1}^{l} W_{об_1}(p, X)\, f(X)\, dX, \\ W_{об_2\int} &= \frac{1}{l - X_1}\int_{X_1}^{l} W_{об_2}(p, X)\, f(X)\, dX, \\ W_{об_u\int} &= \frac{1}{l - X_1}\int_{X_1}^{l} W_{об_u}(p, X)\, f(X)\, dX, \end{aligned}\right\} \tag{20}$$

$W_{об_1\int} = W_{об_1\int}(p, X_1)$, $W_{об_2\int} = W_{об_2\int}(p, X_1)$ — интегральные передаточные функции объекта по каналам возмущений; $W_{об_u\int} = W_{об_u\int}(p, X_1)$ — интегральная передаточная функция объекта по управляющему каналу; $W_{об_1}(p, X)$, $W_{об_2}(p, X)$, $W_{об_u}(p, X)$ — текущие значения передаточных функций; $W_p = W_p(p)$ — передаточная функция регулятора; $W_{к_1} = W_{к_1}(p, X_1)$, $W_{к_2} = W_{к_2}(p, X_1)$ — передаточные функции компенсаторов, обеспечивающие наблюдение за возмущающими воздействиями скользящим интегрированием [Девятов, Гимельштейн, Хорькова, 1963]; E_0 — коэффициент усиления каналов воздействия по возмущениям, равный среднеинтегральному значению влажности в установившемся режиме, при заданном значении влажности выходного концентрата.

Из (18)—(20) получаем для «весовой среднеинтегральной влажности» уравнение:

$$\varphi_{к\int} = \frac{W_{об_1\int} + W_{об_u\int}W_pE_0W_{к_1}}{1 + W_{об_u\int}W_p}\varphi_0 + \frac{W_{об_2\int} + W_{об_u\int}W_pE_0W_{к_2}}{1 + W_{об_u\int}W_p}G_м. \tag{21}$$

Аналогично для выходной величины $\varphi_к$ (рис. 2, *а*)

$$\varphi_к = \left[W_{об_1} - \frac{W_{об_1\int} - E_0W_{к_1}}{1 + W_pW_{об_u\int}}W_{об_u}W_p\right]\varphi_0 + \left[W_{об_2} - \frac{W_{об_2\int} - E_0W_{к_2}}{1 + W_pW_{об_u\int}}W_{об_u}W_p\right]G_м, \tag{22}$$

где $W_{об_1} = W_{об_1}(p, l)$, $W_{об_2} = W_{об_2}(p, l)$, $W_{об_u} = W_{об_u}(p, l)$ — передаточные функции объекта с входа на выход по каналам возмущений и управляющему каналу.

Полная инвариантность $\varphi_к$ относительно φ_0 и $G_н$ будет достигнута при выполнении равенств:

$$\left.\begin{aligned} W_{об_1} - \frac{W_{об_1 \int} - E_0 W_{к_1}}{1 + W_p W_{об_и \int}} W_{об_и} W_p \equiv 0, \\ W_{об_2} - \frac{W_{об_2 \int} - E_0 W_{к_2}}{1 + W_p W_{об_и \int}} W_{об_и} W_p \equiv 0. \end{aligned}\right\} \qquad (23)$$

Рассмотренная система (рис. 2) более сложная, но и более совершенная, что позволяет применить ее для более широкого класса тепловых объектов. Как следует из уравнений (21)—(23), правильный выбор параметра X_1 дает возможность в каждом конкретном случае обеспечить наиболее высокое качество регулирования.

Приборная реализация рассматриваемого варианта структуры САУ не представляет особой сложности и дана на рис. 2, *б*. Система может быть реализована как на регуляторах системы типа ЭАУС, так и на менее дефицитных приборах, например, типа РПИК, ИРМ-240 и др.

ЛИТЕРАТУРА

Девятов Б. Н. Задача синтеза инвариантных систем регулирования распределенных процессов химической технологии. ДАН СССР, т. 150, № 3, 1963.

Девятов Б. Н., Гимельштейн К. П., Хорькова П. В. Об использовании распределенного контроля для создания высококачественных систем управления технологическими процессами тепло- и массообмена. Изв. СО АН СССР, № 2, 1963.

Купфмюллер К. Пределы точности системы регулирования. Т. I. ИФАК, 1960.

Мезин И. С., Малый А. А. Автоматизация сушильных барабанов. Автом. произ. проц. Изд. АН СССР, 1958.

Смольников П. В. Типовой компенсатор возмущения (типовая связь по возмущению) для комбинированных систем автоматического регулирования. Автом. хим. произв., № 2, 1964.

Шапировский М. Р., Иванов В. А., Лисовский Д. И. О границах использования систем автоматического регулирования при управлении вращающейся печью для подсушки медно-цинкового концентрата. Изв. вузов, цветная металлург., № 3, 1965.