

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ВОЗМУЩЕНИЮ

В. М. Перельмутер

Харьков

На структурной схеме разомкнутой системы регулирования по возмущению (рис. 1) $f(t)$ — основное возмущение — стационарная случайная функция времени с математическим ожиданием m_f и корреляционной функцией K_f , $f_n(t)$ — помеха в измерительном устройстве с нулевым средним, некоррелированная с $f(t)$, $x(t)$ — ошибка регулирования, $k_1 W_1(p)$ — передаточная функция объекта по каналу возмущения, $k_2 W_2(p)$ — передаточная функция объекта по каналу регулирующего воздействия.

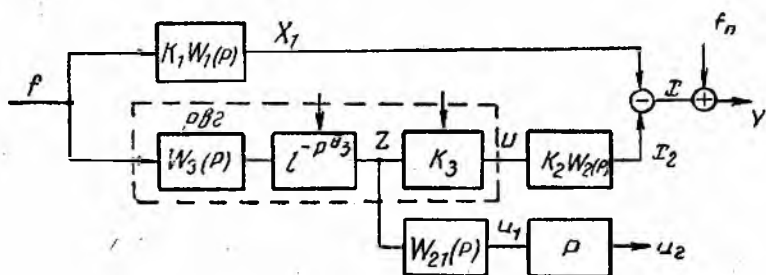


Рис. 1. Структурная схема системы регулирования.

Передаточная функция регулятора, удовлетворяющая условиям абсолютной инвариантности, имеет вид

$$k_3 W_3(p) e^{-p\theta_3} = \frac{k_1 W_1(p)}{k_2 W_2(p)}. \quad (1)$$

В общем случае

$$\frac{W_1(p)}{W_2(p)} = \frac{\sum_{i=1}^m a_i p^i + 1}{\sum_{i=1}^n b_i p^i + 1} e^{-p(\theta_1 - \theta_2)}. \quad (2)$$

Очевидно, если $\theta_2 > \theta_1$, то к условиям абсолютной инвариантности приблизиться невозможно. Поэтому будем предполагать $\theta_2 < \theta_1$. Что касается дробно-рациональной части в (2), то путем правильного выбора $W_3(p)$ и величины чистого запаздывания θ_3 можно во многих случаях обеспечить достаточно малую ошибку регулирования даже при $m > n$.

Для примера рассмотрим систему регулирования толщины на выходе непрерывного стана холодной прокатки [1]. Здесь $f(t)$ — отклонение толщины полосы от номинальной перед последней клетью стана (входная разнотолщинность), измеряемое микрометром, установленным на расстоянии L_1 от оси валков последней клетки, $x(t)$ — выходная разнотолщинность, измеряемая микрометром, установленным на расстоянии L_2 после оси валков последней клетки, $k_1 W_1(p) \approx b_1 e^{-p\theta_1}$, $\theta_1 = \frac{L_1}{V_1} + \frac{L_2}{V_2}$, v_1 и v_2 — скорости прокатки перед и после последней клетки соответственно, $k_2 W_2(p) \approx b_2 \frac{1}{q_2(p)} e^{-p\theta_2}$, $\theta_2 = \frac{L_2}{V_2}$, $q_2(p)$ — полином.

Тогда

$$k_3 e^{-p\theta_3} W_3(p) = \frac{b_1}{b_2} q_2(p) e^{-p(\theta_1 - \theta_2)}. \quad (3)$$

Так как звено с передаточной функцией $q_2(p)$ реализовать нельзя, то для компенсации инерционностей, обусловленных $q_2(p)$, запаздывание регулятора θ_3 делается меньше, чем $\theta_1 - \theta_2$, на величину опережения α , т. е. $\theta_3 = \theta_1 - \theta_2 - \alpha$. Правильным выбором α можно значительно уменьшить среднеквадратичную ошибку регулирования.

На практике параметры передаточных функций объекта подвержены неконтролируемым изменениям, и для приближения к условиям инвариантности необходимо производить автоматическую настройку параметров регулятора. (Например, для прокатных станов b_2 изменяется в 20—50 раз, θ_1 и θ_2 — в 10—20 раз, эквивалентная постоянная времени, соответствующая $q_2(p)$ — в 3—5 раз). Иногда можно ограничиться настройкой только коэффициента усиления регулятора [2, 3].

В статье рассмотрена одновременная настройка коэффициента усиления и чистого запаздывания регулятора, причем предполагается, что параметры $W_3(p)$ не изменяются и выбираются исходя из некоторых средних значений $W_1(p)$ и $W_2(p)$. Основное отличие этого случая от остальных, упомянутых выше, состоит в том, что уравнения настройки получаются нелинейными, что значительно затрудняет анализ.

Оптимальные величины k_3 и θ_3 находят из уравнений

$$\frac{\partial y^2}{\partial k_3} = 2y \frac{\partial y}{\partial k_3} = 0, \quad \frac{\partial y^2}{\partial \theta_3} = 2y \frac{\partial y}{\partial \theta_3} = 0. \quad (4)$$

Если обозначить $W_4(p) = W_2(p) W_3(p)$, то для структурной схемы рис. 1 имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial k_3} &= -k_2 \int_0^\infty w_4(\tau) f(t - \tau - \theta_3) d\tau, \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_3} &= k_2 k_3 \int_0^\infty w_4(\tau) f'(t - \tau - \theta_3) d\tau. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, (4) приводится к виду

$$\bar{\lambda}_1 = \bar{\lambda} u_1 = 0, \quad \bar{\lambda}_2 = \bar{y} u_2 = 0, \quad (6)$$

где u_1 и u_2 — соответственно сигнал на выходе модели объекта и его производная (рис. 1). Необходимость введения звена с передаточной функцией $W_{21}(p)$, моделирующего объект с передаточной функцией $W_2(p)$, связана с тем, что в большинстве практических случаев x_2 измерить нельзя. Так как u_1 получается на выходе динамической модели, то благодаря рациональному ее построению можно получить сигнал «чистой» производной.

Автоматическая настройка ведется по итерационным формулам

$$\begin{aligned} k_{3(n+1)} &= k_{3(n)} + \gamma_1 \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} y(t) u_1(t) dt, \\ \theta_{3(n+1)} &= \theta_{3(n)} + \gamma_2 \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} y(t) u_2(t) dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Предположим сначала, что время усреднения T достаточно велико, так что ошибками усреднения можно пренебречь. Тогда (7) соответствует итерационному методу решения системы нелинейных уравнений, которая в матричной форме записывается в виде

$$\vec{\Lambda}(k_3, \theta_3) = \begin{bmatrix} \bar{\lambda}_1 \\ \bar{\lambda}_2 \end{bmatrix} = 0. \quad (8)$$

Как известно, для сходимости процесса итераций достаточно, чтобы у матрицы

$$\vec{Q} = \begin{bmatrix} 1 + \gamma_1 \frac{\partial \bar{\lambda}_1}{\partial k_3} & \gamma_1 \frac{\partial \bar{\lambda}_1}{\partial \theta_3} \\ \gamma_2 \frac{\partial \bar{\lambda}_2}{\partial k_3} & 1 + \gamma_2 \frac{\partial \bar{\lambda}_2}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

норма была бы меньше единицы при изменениях k_3 и θ_3 в возможных пределах. Для скорости сходимости имеем оценку

$$\|\vec{a}^* - \vec{a}_{(k)}\| \leq \frac{\|\vec{Q}\|_{\max}^k}{1 - \|\vec{Q}\|_{\max}} \|\vec{\Lambda}(\vec{a}_{(0)}) - \vec{a}_{(0)}\|, \quad (10)$$

где $\vec{a} = [k_3, \theta_3]^T$ а $\vec{a}^*$ — решение (8).

Рассмотрим подробнее выражения для λ_1 и λ_2 .

Поскольку

$$\lambda_1 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) \int_0^\infty w_{41}(\tau) f(t - \tau - \theta_3) d\tau dt, \quad (11)$$

то, усредняя, получаем

$$\bar{\lambda}_{1(n)} = k_1 \bar{\varphi}_1(\theta_{3(n)}) - k_2 k_{3(n)} \bar{\beta}_1, \quad (12)$$

где

$$\bar{\varphi}_1(\theta_3) = m_f^2 + \int_0^\infty \int_0^\infty w_1(\tau_1) w_{41}(\tau_2) K_f(\tau_1 - \tau_2 - \theta_3) d\tau_1 d\tau_2, \quad (13)$$

$$\bar{\beta}_1 = m_f^2 + \int_0^\infty \int_0^\infty w_4(\tau_1) w_{41}(\tau_2) K_f(\tau_1 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \quad (14)$$

Аналогично

$$\lambda_2 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) \int_0^\infty w_{41}(\tau) f'(t - \tau - \theta_3) d\tau dt, \quad (15)$$

$$\bar{\lambda}_{2(n)} = k_1 \bar{\varphi}_2(\theta_{3(n)}) - k_2 k_{3(n)} \bar{\beta}_2, \quad (16)$$

$$\bar{\varphi}_2(\theta_3) = \int_0^\infty w_1(\tau_1) w_{41}(\tau_2) K_f'(\tau_1 - \tau_2 - \theta_3) d\tau_1 d\tau_2, \quad (17)$$

$$\bar{\beta}_2 = \int_0^\infty \int_0^\infty w_4(\tau_1) w_{41}(\tau_2) K_f'(\tau_1 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \quad (18)$$

учитывая, что $K_{ff'}(\tau) = \frac{d}{d\tau} K_f(\tau) = K'_f(\tau)$. Отсюда следует, что если объект моделируется без ошибок ($w_{21} = w_2$ и $w_{41} = w_3$), то $\beta_2 = 0$ и, следовательно, второе уравнение в (6) от k_3 не зависит. Таким образом, матрица $\bar{Q}$ имеет вид

$$\bar{Q} = \begin{vmatrix} 1 - \gamma_1 k_2 \bar{\beta}_1 & \gamma_1 k_1 \bar{\varphi}_1 \\ -\gamma_2 k_2 \bar{\beta}_2 & 1 + \gamma_2 k_1 \bar{\varphi}_2 \end{vmatrix}. \quad (19)$$

Норма $\|\bar{a}\|$ должна быть меньше единицы при изменениях k_1 , k_2 и статистических характеристик $f(t)$ в возможных пределах.

Выше предполагалось, что время усреднения T выбрано достаточно большим, так что ошибками усреднения можно пренебречь. При уменьшении T уменьшается время настройки для математических ожиданий величин, но возрастает установившаяся ошибка системы. Средний квадрат ошибки зависит от величин k_3 и θ_3 : $\bar{x}^2 = \psi(k_3, \theta_3)$. Учитывая, что в точке минимума производные $\frac{\partial \psi}{\partial k_3}$ и $\frac{\partial \psi}{\partial \theta_3}$ равны нулю, что в этой же точке смешанная производная $\frac{\partial^2 \psi}{\partial k_3 \partial \theta_3}$ также равна нулю и что после окончания процесса настройки в связи с конечностью времени усреднения T k_3 и θ_3 совершают небольшие колебания около оптимальных значений k_3^* и θ_3^* , имеем

$$\bar{x}^2 = \psi(k_3^*, \theta_3^*) + \psi_{k_3}^* \Delta k_3^2 + \psi_{\theta_3}^* \Delta \theta_3^2. \quad (20)$$

Найдем $\Delta \bar{k}_3^2$ и $\Delta \bar{\theta}_3^2$ в установившемся режиме. В общем случае эта задача достаточно сложна из-за наличия нелинейных зависимостей $\varphi_1(\theta_3)$ и $\varphi_2(\theta_3)$, поэтому введем ряд допущений.

Уравнения (7) записываются в виде

$$k_{3(n+1)} = k_{3(n)} + \gamma_1 (k_1 \varphi_1(\theta_{3(n)}) - k_2 k_{3(n)} \beta_1 + \delta_{1(n)}), \quad (21)$$

$$\theta_{3(n+1)} = \theta_{3(n)} + \gamma_2 (k_1 \varphi_2(\theta_{3(n)}) - k_2 k_{3(n)} \beta_2 + \delta_{2(n)}),$$

где

$$\delta_{1,2} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{1,2}(t) f_p(t) dt.$$

Вычитая из (21) уравнения для математических ожиданий, получаем

$$\Delta k_{3(n+1)} = \Delta k_{3(n)} + \gamma_1 [k_1 (\varphi_1(\theta_{3(n)}) - \bar{\varphi}_1(\bar{\theta}_{3(n)})) - k_2 \Delta k_{3(n)} \beta_1 - k_2 k_{3(n)} \Delta \beta_1 + \delta_{1(n)}],$$

$$\Delta \theta_{3(n+1)} = \Delta \theta_{3(n)} + \gamma_2 [k_1 (\varphi_2(\theta_{3(n)}) - \bar{\varphi}_2(\bar{\theta}_{3(n)})) - k_2 \Delta k_{3(n)} \beta_2 - k_2 k_{3(n)} \Delta \beta_2 + \delta_{2(n)}]. \quad (22)$$

$\varphi_1(\theta_{3(n)})$ можно представить в виде $\bar{\varphi}_1(\bar{\theta}_{3(n)}) + \Delta \varphi_{1(n)}$, где в соответствии с [4] дисперсия централизованной случайной величины $\Delta \varphi_{1(n)}$, вызванная конечностью времени усреднения, практически не зависит от аргумента корреляционной функции и может вычисляться при $\theta_3 = \theta_3^*$. Так как $\theta_{3(n)}$ незначительно отличается от $\bar{\theta}_{3(n)}$ и, кроме того, мы рассматриваем установившийся режим, когда $\theta_{3(n)}$ колеблется в окрестности θ_3^* , представим $\bar{\varphi}_1(\theta_{3(n)}) - \bar{\varphi}_1(\bar{\theta}_{3(n)})$ в виде $\bar{\varphi}_1'(\theta_3^*) \Delta \theta_{3(n)}$.

Производя аналогичные преобразования для φ_2 , получаем

$$\begin{aligned}\Delta k_{3(n+1)} &= \Delta k_{3(n)} + \gamma_1 (k_1 \varphi_1' \Delta \theta_{3(n)} + k_1 \Delta \varphi_{1(n)} - \\ &\quad - k_2 \bar{k}_{3(n)} \Delta \beta_{1(n)} - k_2 \Delta k_{3(n)} \beta_{1(n)} + \delta_{1(n)}, \\ \Delta Q_{3(n+1)} &= \Delta Q_{3(n)} + \gamma_2 (k_1 \varphi_2' \Delta \theta_{3(n)} + k_1 \Delta \varphi_{2(n)} - k_2 k_{3(n)} \Delta \beta_{2(n)} - \\ &\quad - k_2 \Delta k_{3(n)} \beta_{2(n)} + \delta_{2(n)}).\end{aligned}\quad (23)$$

Так как рассматриваются колебания параметров около величин k_3^* и θ_3^* , для существенного упрощения вычислений примем $k_{3(n)} = k_3^*$. Обозначим

$$\begin{aligned}1 - \gamma_1 k_2 \beta_1 &= c_{11} = \bar{c}_{11} + \Delta c_{11}, \\ \gamma_1 k_1 \varphi_1' &= c_{12}, \quad \gamma_1 (k_1 \Delta \varphi_1 + \delta_1 - k_2 k_3^* \Delta \beta_1) = \Delta c_{11}, \\ -\gamma_2 k_2 \beta_2 &= c_{21} = \bar{c}_{21} + \Delta c_{21}, \quad 1 + \gamma_2 k_1 \varphi_2' = c_{22}, \\ \gamma_2 (k_1 \Delta \varphi_2 + \delta_2 - k_2 k_3^* \Delta \beta_2) &= \Delta c_{22}.\end{aligned}$$

Тогда (23) записывается в виде

$$\begin{aligned}\Delta k_{3(n+1)} &= c_{11(n)} \Delta k_{3(n)} + c_{12} \Delta \theta_{3(n)} + \Delta c_{1(n)}, \\ \Delta \theta_{3(n+1)} &= c_{21(n)} \Delta k_{3(n)} + c_{22} \Delta \theta_{3(n)} + \Delta c_{2(n)}.\end{aligned}\quad (24)$$

Статистические свойства случайных величин $\Delta k_{3(n)}$, $\Delta \theta_{3(n)}$ характеризуются вектором $\bar{D}_{a(n)} = |\Delta k_{3(n)}^2, \Delta \theta_{3(n)}^2, \Delta k_{3(n)}, \Delta \theta_{3(n)}|^t$, для нахождения которого возведем каждое из уравнений (24) в квадрат, а также перемножим их и результат усредним. При этом учтем независимость $\Delta k_{3(n)}$ и $\Delta \theta_{3(n)}$ от $\Delta \beta_{1,2(n)}$, $\delta_{1,2(n)}$ и $\Delta \varphi_{1,2(n)}$. Получаем

$$\bar{D}_{a(n+1)} = \bar{C} \bar{D}_{a(n)} + \bar{D}_c, \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned}\bar{D}_c &= |\Delta \bar{c}_{11}^2, \Delta \bar{c}_{22}^2, \overline{\Delta c_{11} \Delta c_{22}}|^t, \\ \bar{C} &= \begin{vmatrix} \bar{c}_{11}^2 & c_{12}^2 & 2\bar{c}_{11}c_{12} \\ \bar{c}_{21}^2 & c_{22}^2 & 2\bar{c}_{21}c_{22} \\ \overline{c_{11}c_{21}} & c_{12}c_{22} & \bar{c}_{11}c_{22} + c_{12}\bar{c}_{21} \end{vmatrix}.\end{aligned}\quad (26)$$

При

$$n \rightarrow \infty \quad \bar{D}_a \rightarrow (\bar{E} - \bar{C})^{-1} \bar{D}_c, \quad (27)$$

где $\bar{E}$ — единичная матрица. Условие устойчивости — все собственные значения $\bar{C}$ по модулю должны быть меньше единицы. Отметим, что устойчивость зависит от времени усреднения T , так как T влияет на элементы $\bar{c}_{11}^2$, $\bar{c}_{21}^2$, $\overline{c_{11}c_{21}}$.

Если в системе возможно выполнение условия $k_1 W_1 = k_2 k_3 W_2 W_3$ и $f_p = 0$, то $x(\infty) = 0$, и конечность времени усреднения влияет только на скорость сходимости по дисперсии. Общая длительность процесса настройки $T_g = N(T + T_n)$, где T_n — время паузы, необходимое для совершения рабочего шага и окончания переходных процессов, N — число шагов, которое обратно пропорционально $\lg \|\bar{C}\| \cdot \|\bar{C}\|$ в свою очередь, уменьшается при увеличении T , т. е. $\lg \|\bar{C}\|$ при этом увеличивается по

модулю, ибо $\|\vec{C}\| < 1$. Отсюда следует, что существует оптимальная величина T , обеспечивающая минимальное время переходных процессов.

В заключение рассмотрим режим слежения за непрерывно меняющимися характеристиками объекта. Уравнение процесса настройки

$$\vec{a}_{(n+1)} = \vec{a}_{(n)} - \Gamma \Lambda_{(n+1)} (\vec{a}_{(n)}) \quad (28)$$

можно записать в виде

$$\vec{a}_{(n+1)}^* - \vec{a}_{(n+1)} = \vec{a}_{(n+1)}^* - \vec{R}_{(n+1)} (\vec{a}_{(n)}) = \vec{R}_{(n+1)} (\vec{a}_{(n+1)}^*) - \vec{R}_{(n+1)} (\vec{a}_{(n)}), \quad (29)$$

где

$$\vec{R}_{(n+1)} (\vec{a}_{(n)}) = \vec{a}_{(n)} - \Gamma \Lambda_{(n+1)} (\vec{a}_{(n)}),$$

Γ — диагональная матрица с элементами $\gamma_1 \gamma_2$,

$\vec{a}_{(n)}^*$ — решение уравнения $\vec{a} = \vec{R}_{(n)} (\vec{a})$.

Отсюда

$$\|\vec{a}_{(n+1)}^* - \vec{a}_{(n+1)}\| \leq q \|\vec{a}_{(n+1)}^* - \vec{a}_{(n)}\|, \quad (30)$$

где q — максимально возможная норма матрицы $\vec{Q}$ при изменениях $\vec{\Lambda}_{(n)}$ и $\vec{a}$ в возможных пределах. Для сходимости процесса достаточно, чтобы q было меньше 1.

Предположим, что $\vec{a}_{(n)}^*$ изменяется по линейному закону, т. е. $\vec{a}_{(n+1)}^* = \vec{a}_{(n)}^* + \vec{b}$. Тогда при больших n вектор $\vec{a}_{(n)}$ также изменяется по линейному закону с такой же скоростью, но отстает от $\vec{a}_{(n)}^*$ на величину $\Delta \vec{a}$. Тогда

$$\|\vec{a}_{(n+1)}^* - \vec{a}_{(n)}\| = \|\vec{a}_{(n+1)}^* - \vec{a}_{(n+1)} + \vec{b}\| \leq \|\vec{a}_{(n+1)}^* - \vec{a}_{(n+1)}\| + \|\vec{b}\| \quad (31)$$

и

$$\|\vec{a}_{(n+1)}^* - \vec{a}_{(n+1)}\| \leq q \|\vec{a}_{(n+1)}^* - \vec{a}_{(n+1)}\| + q \|\vec{b}\|,$$

т. е.

$$\|\Delta \vec{a}\| \leq \frac{q \|\vec{b}\|}{1 - q}. \quad (32)$$

Если $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$, то q можно представить в виде

$$q = 1 - \gamma m$$

и

$$\|\Delta \vec{a}\| \leq \frac{1 - \gamma m}{\gamma m} \|\vec{b}\|. \quad (33)$$

Пример. Пусть $W_1(p) = e^{-\theta_1 p}$, $k_2 W_2(p) = 1$, k_1 и θ_1 имеют начальные значения 1 и 0,4 соответственно и могут изменяться по законам $k_1 = k_{10} + 0,01t$, $\theta_1 = 0,005t$, однако

$$k_1 \leq 2, \quad \theta_1 \leq 0,9, \quad m_f = 0, \quad S_f(p) = \frac{4}{(p^2 + 2p + 1)(p^2 - 2p + 1)}.$$

Находим элементы матрицы (19). Обозначая $\theta_1 - \theta_3 = \alpha$, получаем $\bar{\varphi}_1 = e^{-\alpha}(1 + \alpha)$, $\bar{\beta}_1 = 1$, $\bar{\varphi}_2 = \alpha e^{-\alpha}$, $\beta_2 = 0$. Можно показать, что при

$\gamma_1 = \gamma_2 = 0,5$ норма $\bar{Q}$ будет меньше 1 при изменениях k_1 , θ_1 и θ_3 в возможных пределах. Процессы настройки k_3 и θ_3 показаны на рис. 2.

Рассмотрим влияние конечности времени усреднения при $k_1 = 2$, $\theta_1 = 0,9$.

Находим

$$c_{11} = 0,5(1 - \Delta\beta_1), \bar{c}_{11}^2 = 0,25(1 + D_{\beta_1}), c_{12} = c_{22} = 0, \bar{c}_{21}^2 = 0,25D_{\beta_1}.$$

Матрица $\bar{C}$ имеет два нулевых собственных значения и одно $\mu_1 = 0,25 \times (1 + D_{\beta_1})$. Условие устойчивости $-D_{\beta_1} < 3$. Так как для данной корреляционной функции $D_{\beta} \approx \frac{5}{T}$, то сходимость наблюдается при $T > 1,67$ сек.

В качестве $\|\bar{C}\|$ примем μ_1 . Тогда оптимальная величина T , которая минимизирует величину $\frac{T + T_n}{\lg 0,25(1 + \frac{5}{T})}$, равна 4,5 сек (при $T_n = 1$ сек.).

Найдем верхнюю границу для ошибки при работе системы в режиме слежения. Вектор $\bar{b} = [0,022, 0,011]^T$. Евклидова норма $\bar{b} = 0,025$. Максимальная величина $\|\bar{a}\| = q = 0,8$. Тогда $\|\Delta a\| \leq 0,1$.

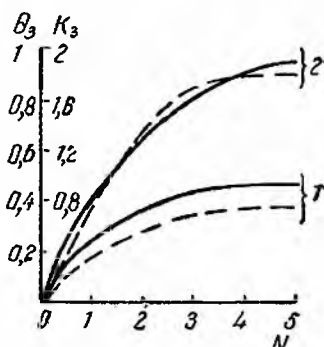


Рис. 2. Переходные процессы настройки параметров: — k_3 — θ_3 ,
1 — $k_1 = 1$, $\theta_1 = 0,4$ сек,
2 — $k_1 = 2$, $\theta_1 = 0,9$ сек.

ВЫВОДЫ

Предложенный в статье беспоисковый метод настройки коэффициента усиления и чистого запаздывания регулятора является эффективным при использовании в системах регулирования по возмущению, в которых характеристики объекта изменяются в процессе работы. При этом обеспечиваются существенно меньшие времена настройки и большая точность, чем при использовании поисковых алгоритмов [5]. Основные параметры системы самонастройки можно выбирать по формулам, приведенным в статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Перельмутер. Системы регулирования по возмущению с автоматической настройкой параметров регулятора. Тезисы докладов на III Всесоюзной конференции по теории инвариантности. Киев, 1966.
2. А. А. Беленький. К вопросу о реализуемости подстройки параметров компенсатора в системах регулирования по возмущению, «Автоматика и телемеханика», 1962, № 2.
3. В. М. Перельмутер. О настройке коэффициента усиления в системах регулирования по возмущению. «Автоматика», 1966, № 5.
4. Дж. Бендат. Основы теории случайных шумов и ее применения. «Наука», 1965.
5. С. А. Догановский. Автоматическая подстройка параметров компенсатора в системах регулирования по возмущению. «Автоматика и телемеханика», 1959, № 8.