ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտութ. սերիա XXVII, № 3, 1974 Серия технических наук

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Р. С. РАФАЕЛЯН, Г. Л. КАНТАРДЖЯН, Р. А. ХАЧАТРЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНЕРЦИОННЫХ СИСТЕМ С КОРРЕКТИРОВКОЙ РАБОЧИХ ШАГОВ ПО СКОРОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДРЕЙФА СТАТИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Большинство объектов, встречающихся на практике, можно с достаточной степенью точности аппроксимировать двумя апериодическими звеньями (1). При этом отыскание и поддерживание оптимального входного управления происходит в условиях, когда управляемая система подвержена низкочастотным возмущениям $\varphi(t)$, приводящим к непрерывному дрейфу статической экстремальной характеристики, в частности, случаю малоизученного горизонтального дрейфа. Доказано, что неучет горизонтального дрейфа статической экстремальной характеристики может привести к выходу системы из состояния устойчивости, т. е. система вместо нахождения значения входного параметра, соответствующего экстремуму выхода, может в процессе поиска сместить входной параметр в одно из своих крайних положений и, таким образом, нарушить нормальный ход технологического цикла (если система связана с таковым), а в некоторых случаях даже привести к созданию аварийной ситуации.

Выведем алгоритм, определяющий стратегию поиска последовательности управлений, применяя идею прогнозирования установившегося значения [2, 3] с корректировкой величин шагов в зависимости от скорости горизонтального дрейфа, и обеспечивающий устойчивость в процессе поиска экстремума.

Структурная схема системы показана на рис. 1. Экстремальное звено аппроксимировано параболой второго порядка $Q_{ст} - Q^* = -kx^2$. Передаточные функции приняты в виде $W_i(b) = \frac{1}{T_i p + 1}$, где $T_1 \neq T_2$ —заданные постоянные времени апериодических звеньев.

$\xi(t)$ — аддитивные случайные помехи, накладываемые на выходе системы: они представляют собой случайный процесс с ограниченной дисперсией (наличие смещенности их не будет ограничивать общности выводов).

$\Phi(p)$ — фильтр, отфильтровывающий (полностью или частично) помехи $\xi(t)$. Поскольку постоянная времени фильтра намного меньше T_1 и T_2, то при исследовании динамики системы ею можно пренебречь.

В УВМ значения $Q^{изм}(t)$ преобразуются в цифровой код, и, далее, по этой информации реализуется выводимый алгоритм с воздействием на управляемый входной параметр $x(t)$.

Предположим, что скорость $V^{*}(t)$ горизонтальной составляющей дрейфа в интервалах между двумя последовательными смещениями входного управляющего воздействия апроксимирована своими средними значениями $V_i^{ср}$, что естественно для инерционных объектов, в которых превалирует постоянная составляющая дрейфа.

Связь между динамическим выходом Q и статическим выходом $Q_{ст}$ представится уравнением

$$(T_1 p+1)(T_2 p+1)Q=Q_{ст} \tag{1}$$

с начальными условиями: при $t=0$

$$x=x_0\,, \qquad Q=Q_0 \qquad Q'=Q_0', \tag{2}$$

причем, в общем случае, $Q_0 \neq Q(x_0)$.

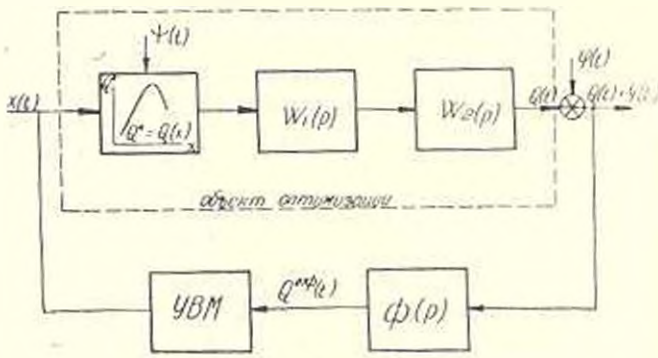

Рис. 1.

Пусть в момент времени $t=0^{+}$ в произвольном направлении совершено скачкообразное изменение управления на величину Δx. Полагаем, что статическая характеристика дрейфует вправо, что не сужает общности рассуждений. Во временном интервале $0 \leq t < t_1$ переходный процесс определяется начальными условиями (2) и переменным во времени (из-за дрейфа) возмущающим воздействием

$$Q_{ст}-Q_0=a_0-[k(x_0-V_0^{ср}t)^2-kx_0^2]=a_0+2kx_0 V_0^{ср}t-k(V_0^{ср})^2t^2, \tag{3}$$

где a_0 — составляющая возмущающего воздействия при $V_0^{ср}=0$. Перейдем к системе координат $\Delta=Q-Q_0$; t. Тогда переходный процесс опишется уравнением

$$(T_1 p+1)(T_2 p+1)\Delta=a_0+2kx_0 V_0^{ср}t-k(V_0^{ср})^2t^2 \tag{4}$$

с начальными условиями:

$$\Delta(t=0)=0; \qquad \Delta'(t=0)=\Delta_0'. \tag{5}$$

Общее решение уравнения (4) с начальными условиями (5) имеет вид:

$$\Delta(t)=a_0A(t)+\Delta_0'B(t)+k(V_0')^2C(t)+kV_0'x_0D(t), \tag{6}$$

где

$$A(t)=1-\frac{T_1}{T_1-T_2}e^{-t/T_1}+\frac{T_2}{T_1-T_2}e^{-t/T_2};$$

$$B(t)=\frac{T_1T_2}{T_1-T_2}\left(e^{-t/T_1}-e^{-t/T_2}\right);$$

$$C(t)=2\left|\frac{T_1^2}{T_1-T_2}e^{-t/T_1}-\frac{T_2^2}{T_1-T_2}e^{-t/T_2}-\frac{t^2}{2}+t(T_1+T_2)-T_1^2-T_1T_2-T_2^2\right|;$$

$$D(t)=2\left|\frac{T_1^2}{T_1-T_2}e^{-t/T_1}-\frac{T_2^2}{T_1-T_2}e^{-t/T_2}+t-T_1-T_2\right|.$$

Обозначив $k(V_0')^2=\beta_0$, $kV_0'=\gamma_0$ и придав $\Delta(t)$ в этом интервале по номеру входного смещения индекс 0, (6) запишется в виде:

$$\Delta_0(t)=a_0A(t)+\Delta_0'B(t)+\beta_0C(t)+\gamma_0x_0D(t). \tag{9}$$

Таким образом, искомые неизвестные a_0, Δ_0', β_0 и γ_0 связаны с $\Delta_0(t)$ функциональной зависимостью (9), аналитический вид которой известен. Для определения неизвестных даются n выдержек времени через равные интервалы времени τ, в конце которых измеряются значения $\Delta_0(i\tau)=\Delta_{0i}$. Интервалы выдержек выбираются, исходя из параметров объекта. Получаем систему $n+1$ линейных алгебраических уравнений:

$$|a_0A_i+\Delta_0'B_i+\beta_0C_i+\gamma_0x_0D_i-\Delta_{0i}=0|. \tag{10}$$

Если в систему (10) подставить какой-нибудь набор значений $\{a_0;\ \Delta_0';\ \beta_0,\ \gamma_0\}$, то, в общем случае, левые части уравнений (10) будут равны не нулю, а соответственно $-\varepsilon_0$, $\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_n$ из-за неидеальной фильтрации аддитивных помех $\varphi(t)$, накладываемых на динамическом выходе системы (см. рис. 1).

Определим систему значений a_0; Δ_0'; β_0; γ_0 таким образом, чтобы сумма квадратов ошибок

$$E=\sum_{i=0}^{n}\varepsilon_i^2=\sum_{i=0}^{n}(a_0A_i+\Delta_0'B_i+\beta_0C_i+\gamma_0x_0D_i-\Delta_{0i})^2 \tag{11}$$

была минимальной. Отсюда получаем систему:

$$\frac{1}{2}\frac{\partial E}{\partial a_0}=a_0\sum_{i=0}^{n}A_i^2+\Delta_0'\sum_{i=0}^{n}A_iB_i+\beta_0\sum_{i=0}^{n}A_iC_i+\gamma_0x_0\sum_{i=0}^{n}A_iD_i-\sum_{i=0}^{n}A_i\Delta_{0i}=0;$$

$$\frac{1}{2}\frac{\partial E}{\partial \Delta_0} = a_0\sum_{i=0}^{n} A_i B_i + \Delta_0'\sum_{i=0}^{n} B_i^2 + \delta_0\sum_{i=0}^{n} B_i C_i + \gamma_0 x_0 \sum_{i=0}^{n} B_i D_i - \sum_{i=0}^{n} B_i \Delta_{0i} = 0;$$

$$\frac{1}{2}\frac{\partial E}{\partial \gamma_0} = a_0 x_0 \sum_{i=0}^{n} A_i D_i + \Delta_0' x_0 \sum_{i=0}^{n} D_i B_i + \delta_0 x_0 \sum_{i=0}^{n} D_i C_i + \gamma_0 x_0^2 \sum_{i=0}^{n} D_i^2 - x_0 \sum_{i=0}^{n} \Delta_{0i} D_i = 0;$$

$$\frac{1}{2}\frac{\partial E}{\partial \delta_0} = a_0 \sum A_i C_i + \Delta_0' \sum_{i=0}^{n} B_i C_i + \delta_0 \sum_{i=0}^{n} C_i^2 + \gamma_0 x_0 \sum D_i C_i - \sum \Delta_{0i} C_i = 0. \tag{12}$$

Решив систему (12), определим наиболее вероятные оценки a_0^*, $\Delta_0'^*$, δ_0^*, γ_0^* параметров a_0, Δ_0', δ_0, γ_0.

Полученные оценки представятся в виде:

$$a_0^* = \frac{|D_{a_0}|}{|D|};\quad \Delta_0'^* = \frac{|D\Delta_0'|}{|D|};\quad \delta_0^* = \frac{|D_{\delta_0}|}{|D|};\quad \gamma_0^* = \frac{|D_{\gamma_0}|}{|D|}, \tag{13}$$

где $|D|$ — главный определитель системы (12), а $|D_{a_0}|$, $|D\Delta_0'|$, $|D_{\delta_0}|$, $|D_{\gamma_0}|$ — определители, полученные из $|D|$ заменой столбцов при соответствующих индексах определителей столбцом свободных членов.

Используя полученные оценки a_0^*, $\Delta_0'^*$, δ_0^* и γ_0^*, можем определить наиболее вероятную оценку Q_1^* значения статической характеристики Q_1, соответствующего фиксированному значению управления x_1,

$$Q_1^* = Q_0 + a_0^* + 2\gamma_0^* x_0 n\tau - \delta_0^*(n\tau^2). \tag{14}$$

Далее, сравниваем значения Q_1^* и Q_0,

$$r_0 = Q_1^* - Q_0. \tag{15}$$

Новое скачкообразное изменение управляющего воздействия x на Δx_1 производим по закону

$$\Delta x_1 = |\Delta x| \operatorname{sign}[r_0 \cdot \Delta x_0] + \frac{\delta_0^*}{\gamma_0^*} n\tau, \tag{16}$$

где Δx — постоянная составляющая рабочего смещения входного параметра;

$\frac{\delta_0^*}{\gamma_0^*} n\tau$ — переменная составляющая рабочего смещения, связанная с корректировкой его по скоростям дрейфа статической характеристики. Наличие этой составляющей позволяет как бы "догонять" дрейфующую статическую характеристику. При этом имеем:

$$x_1 = x_0 + \Delta x_1. \tag{17}$$

Таким образом, за промежуток времени $n\tau$, если не считать времени, необходимого для производства необходимых вычислений, можно определить Q_1^*.

Далее изменятся уравнения переходного процесса и начальные условия. Произведем параллельный перенос осей координат (отчет времени начнем с момента времени изменения управляющего воздействия):

$$t' = t - n\tau; \ \Delta_1 = Q - (Q_0 + \Delta_{0n}).$$

Уравнение переходного процесса примет вид:

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)\Delta_1 = 2\gamma_1 x_1 t' - \delta_1 t'^2, \tag{18}$$

с начальными условиями:

$$\Delta_1(t' = 0) = 0; \quad \Delta_1(t' = 0) = \Delta_1^{\cdot}(0), \tag{19}$$

где

$$\Delta_1^{\cdot}(0) = \Delta_0^{\cdot}(n\tau);$$

$$\Delta_0^{\cdot}(n\tau) = a_0 A'(n\tau) + \Delta_0^{\cdot} B(n\tau) + \delta_0 C'(n\tau) + \gamma_0 x_0 D'(n\tau); \tag{20}$$

a_1 — возмущение, возникающее при $V_1^{\tau} = 0$.

Следовательно, начиная с $t' = 0$, переходный процесс в системе будет описываться выражением:

$$\Delta_1(t') = a_1 A(t') + \Delta_0^{\cdot} B(t') + \delta_1 C(t') + \gamma_1 x_1 D(t'), \tag{21}$$

а приращения $\Delta_{1m}(m = 0, 1, 2, \ldots, n)$ запишутся в виде:

$$|\Delta_{1m} = a_1 A_m + \Delta_1^{\cdot} B_m + \delta_1 C_m + \gamma_1 x_1 D_m|. \tag{22}$$

Используя метод наименьших квадратов, определим наиболее вероятные оценки параметров $a_1, \Delta_1^{\cdot}, \delta_1, \gamma_1$:

$$a_1^* = \frac{|D_{a_1}|}{|D|}; \quad \Delta_1'^* = \frac{|D_{\Delta_1}|}{|D|}; \quad \delta_1^* = \frac{|D_{\delta_1}|}{|D|}; \quad \gamma_1^* = \frac{|D_{\gamma_1}|}{|D|}. \tag{23}$$

Далее можем определить значение статической экстремальной характеристики, соответствующее входному управляющему воздействию x_1,

$$Q_2^* = a_1^* + [Q_0 + \Delta_0(n\tau)] + 2\gamma_1^* x_1 n\tau - \delta_1^* (n\tau)^2. \tag{24}$$

Следующее изменение входного управляющего воздействия совершается после определения

$$r_1 = Q_2^* - Q_1^* \tag{25}$$

по закону

$$\Delta x_2 = |\Delta x| \operatorname{sign} [r_1 \cdot \Delta x_1] + \frac{\delta_1^*}{\gamma_1^*} n\tau, \tag{26}$$

при этом:

$$x_2 = x_1 + \Delta x_2. \tag{27}$$

Обобщая полученные результаты, получим, что после произвольного l-го изменения входного управляющего воздействия Q_{1l}^* представится в виде:

$$Q_l^* = Q_{l-1}^* + [Q_0 + \Delta_0(n\tau) + \Delta_1(n\tau) + \ldots + \Delta_{l-1}(n\tau)] + 2\gamma_{l-1}^* x_{l-1} n\tau - \\ - \delta_{l-1}^* (n\tau)^2. \tag{28}$$

Придавая в (28) индексу i значение $i-1$, получаем выражение для Q^*_{i-1} и определяем

$$r_{i-1} = Q^*_i - Q^*_{i-1}. \qquad (29)$$

Направление следующего шага определено по закону

$$\Delta x_i = |\Delta x| \operatorname{sign}[r_{i-1} \cdot \Delta x_{i-1}] + \frac{\dot{\delta}_{i-1}}{\dot{\eta}_{i-1}} n\tau, \qquad (30)$$

при этом:

$$x_i = x_{i-1} + \Delta x_i. \qquad (31)$$

Выражения (30) и (31) определяют стратегию приспосабливающегося к горизонтальному дрейфу быстрого поиска оптимума в ШСЭУ инерционными объектами.

Реализация выведенной стратегии в системах экстремального управления кроме быстродействия, связанного с экстраполяцией значений Q^* и корректировкой рабочих шагов по скорости дрейфа, обеспечивает и устойчивость системы в процессе ее функционирования.

Завод „Поливинилацетат". Поступило 26. VI. 1974.

Ռ. Ս. ՌԱՖԱՅԵԼՅԱՆ, Գ. Լ. ՂԱՆԹԱՐՋՅԱՆ, Ռ. Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ԻՆԵՐՑԻՈՆ ՍԻՍՏԵՄԻ ՕՊՏԻՄԻԶԱՑԻԱՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՔԱՅԼԵՐԻ ՃՇՏՈՒՄՈՎ ԸՍՏ ՍՏԱՑԻՉ ՈՉ-ԳԾԱՅԻՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԻ ՀՈՐԻԶՈՆԱԿԱՆ ԴՐԵՅՖԻ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ

Ամփոփում

Հետազոտված է էքստրեմալ կարգավորման քայլային սիստեմ, որի մեջ իրականացված է վերջնական ժամանակամիջոցի գուշակման ալգորիթմը։ Օբյեկտը գտնվում է ցածր հաճախության գրգռումների ազդեցության տակ, որոնք սաստիկ էքստրեմալ բնութագիրը հանգեցնում են հորիզոնական դրեյֆի։ Որոնման գործողության արագացնելու և սիստեմի կայունությունը ավելացնելու նպատակով կատարվում է աշխատանքային քայլերի ճշտում՝ հաշվի առնելով ստատիկ էքստրեմալ բնութագրի հորիզոնական դրեյֆի արագությունը։ Ալգորիթմը թույլ է տալիս արմատապես նվազեցնել կեղծ քայլերի հավանականությունը և դրանով իսկ կանխել սիստեմի դուրս գալը կայուն վիճակից։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Арефьева Б. А.* Оптимизация инерционных процессов. Изд. «Машиностроение», 1969.
2. *Казакевич В. В., Рафаелян Р. С., Амиян Л. Р.* «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XX, № 4, 1967.
3. *Казакевич В. В.* О процессе экспериментального регулирования инерционных объектов при наличии возмушения. «Труды I международного конгресса ИФАК», том II. Изд. АН СССР, 1961.