

РЕГУЛЯТОР ХОДА ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ С УПРАВЛЕНИЕМ ПО ПУТИ

Е. Я. Иванченко, В. А. Каменев

Х а р ь к о в

При регулировании хода подъемных машин основной задачей является выдерживание с определенной точностью заданной тахограммы подъема. При этом скорость обычно задается в функции пути. Это связано с тем, что основной задачей регулятора хода является обеспечение необходимой скорости в заданных точках ствола, в частности нулевой при подходе к горизонту, а это при таком способе управления осуществить довольно трудно.

Компенсация погрешности работы системы регулирования происходит в период «дотягивания», т. е. при движении на пониженной равномерной скорости. Это приводит к значительному увеличению времени подъема и излишнему усложнению программного устройства.

Применение управления по пути устраняет указанный недостаток. Известно, что управление по пути, а это равнозначно введению в закон регулирования интеграла, повышает статическую точность системы, что необходимо в конечном итоге, но снижает степень устойчивости системы [1].

В этом случае система становится астатической по управляющему воздействию и статической по возмущениям. Поэтому в такой системе весьма важно обеспечение необходимой степени устойчивости.

Качество системы регулирования подъемной машиной имеет первостепенное значение. Как показано в работе [3], наилучшим для подъемной машины является аperiodический переходный процесс. Кроме того, имеются ограничения, накладываемые правилами безопасности, например, ограничение максимального ускорения, скорости и др.

Учитывая это и имея в виду, что неизменяемая часть системы автоматического регулирования (САР) обычно определена заранее, для синтеза корректирующих устройств, обеспечивающих необходимую устойчивость и заданное качество регулирования, удобно применить метод типовых (стандартных) уравнений, нашедший широкое распространение в практике следящего привода [2].

При пользовании этим методом обычно наибольшие трудности вызывает реализация дифференциаторов, особенно высоких порядков. Однако применение элементов вычислительной техники, находящихся все более широкое распространение для управления подъемной машиной, позволяет успешно справиться с этим. Кроме того, привод подъемной машины по сравнению со следящим имеет свои особенности, в частности, большие мощности, большие скорости при сравнительно малых ускорениях, что, возможно, приведет к необходимости создания других нормированных уравнений, построенных, например, на основе критерия оптимальной добротности [3].

В дальнейшем мы рассматриваем многоканатную подъемную машину с приводом по системе Г—Д.

Пусть неизменяемая часть САР содержит промежуточный магнитный усилитель ПМУ и электромашинный усилитель поперечного поля ЭМУ. В результате анализа становится ясно, что без корректирующих устройств САР не может обеспечить заданной степени устойчивости и необходимого качества переходного процесса. Необходимо найти структуру скорректированной САР.

Если пренебречь постоянной времени цепи якорей двигателя и генератора, а также постоянной времени ПМУ, что допустимо при рассматриваемом мощном приводе, то данная САР без корректирующих устройств будет описываться уравнением пятого порядка, которое выведено нами при общепринятых упрощениях. Здесь не учитывается влияние реакции якоря, вихревых токов, гистерезиса и др.

$$(p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) \varphi = a_0 \mu - B_0 - (G_3 p^3 + G_2 p^2 + G_1 p + G_0) \varepsilon_B, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} a_4 &= \frac{T_3}{T_2} + \frac{1}{T_B} + \frac{1}{B}; \quad B_0 = \frac{k_3 M_{ст}}{\Delta x k_m a_5}; \\ a_3 &= \frac{1}{T_2} + \frac{T_3}{T_B T_2} + \frac{T_3}{B T_2} + \frac{1}{B T_B}; \quad G_3 = \frac{k_3 M_H}{\Delta x k_m a_5}; \\ a_2 &= \frac{1}{T_B T_2} + \frac{1}{B T_2} + \frac{T_3}{B T_2 T_2}; \quad G_2 = \frac{k_3 M_H}{\Delta x k_m} \left(\frac{T_3}{B T_2} + \frac{1}{B T_B} \right); \\ a_1 &= \frac{1}{B T_B T_2} = \frac{1}{a_5}; \quad G_1 = \frac{k_3 M_H}{\Delta x k_m} \left(\frac{1}{B T_2} + \frac{T_3}{B T_B T_2} \right); \\ a_0 &= \frac{k \gamma}{B T_B T_2}; \quad G_0 = \frac{k_3 M_H}{\Delta x k_m a_5}; \\ \varphi &= \frac{x_3}{\Delta x}; \quad \varepsilon_B = \frac{M_H}{M_H}; \\ k_R &= \frac{1}{R}; \quad \mu = \frac{h_3}{\Delta x}; \\ k_3 &= \frac{r_{я}}{k_e k_R}; \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь T_2 , T_3 — постоянные времени ЭМУ;

T_B — постоянная времени обмотки возбуждения генератора;

B — электромеханическая постоянная времени;

k — коэффициент усиления разомкнутой системы;

k_3 — коэффициент усиления двигателя;

$r_{я}$ — сопротивление цепи якорей Г—Д;

k_e — коэффициент противо-э. д. с. подъемного двигателя;

R — радиус канатоведущего шкива;

x_3 — путь, проходимый подъемным сосудом;

Δx — путевой квант;

k_m — коэффициент момента;

γ — крутизна задающего сигнала;

$M_{ст}$ — момент статических сопротивлений;

M_H — номинальный момент двигателя;

M_B — момент возмущений, приведенный к валу двигателя;

h_3 — задаваемый путь.

Подставив в уравнение (1) $\varphi = \mu - \theta$, после преобразований получим

$$\begin{aligned} & (p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) \theta = \\ & = (p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p) \mu + B_0 + \\ & + (G_3 p^3 + G_2 p^2 + G_1 p + G_0) \varepsilon_{\text{в}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где θ — погрешность системы.

В нашей работе начальные условия приняты нулевыми, как и в работе [3]. Устойчивость системы определяется характеристическим уравнением, полученным из уравнения (3) приравниванием нулю его правой части, а ошибка в переходном процессе состоит из ошибки по управляющему и возмущающему воздействиям. Заданную степень устойчивости и необходимое качество регулирования можно получить, если задать корни характеристического уравнения и попытаться свести к нему уравнение (3). Для получения минимальной ошибки в переходном процессе необходимо свести к минимуму коэффициенты в правой части уравнения (3).

Таким образом, желаемое уравнение можно записать в виде

$$\begin{aligned} & [p^5 + (a_4 + \sigma_4'') p^4 + (a_3 + \sigma_3'') p^3 + (a_2 + \sigma_2'') p^2 + \\ & + (a_1 + \sigma_1'') p + \sigma_0''] \theta = [p^5 + (a_4 - \sigma_4') p^4 + (a_3 - \sigma_3') + (a_2 - \sigma_2') p^2 + \\ & + (a_1 - \sigma_1') p] \mu + (B_0 - \sigma_0'') + \\ & + [(G_3 - \sigma_3'') p^3 + (G_2 - \sigma_2'') p^2 + (G_1 - \sigma_1'') p + \\ & + (G_0 - \sigma_0'')] \varepsilon_{\text{в}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где σ — коэффициент выхода корректирующего устройства;

τ_i — крутизна сигнала соответствующего выхода.

Следовательно, задача сводится к определению крутизны выхода сигнала по соответствующей производной для получения желаемого уравнения.

Числовые значения:

$$\begin{aligned} T_2 &= 0,0067 \text{ сек}^2; \quad T_3 = 0,159 \text{ сек}; \quad B = 1,32 \text{ сек}; \\ k &= 29,3 \text{ м/сек. в}; \quad M_{\text{ст}} = 6850 \text{ кгм}^2/\text{сек}^2; \quad T_{\text{в}} = 2,44 \text{ сек}; \\ M_{\text{н}} &= 8120 \text{ кгм}^2/\text{сек}^2; \quad R = 2,5 \text{ м}; \quad \Delta x = 0,1 \text{ м}. \end{aligned}$$

Тогда $a_5 = 0,0216 \text{ сек}^4$; $a_4 = 24,87 \text{ сек}^{-1}$;

$$\begin{aligned} a_3 &= 177,8 \text{ сек}^{-2}; \quad a_2 = 181,7 \text{ сек}^{-3}; \quad a_1 = 43,6 \text{ сек}^{-4}; \\ B_0 &= 14\,750 \text{ сек}^{-5}; \quad G_0 = 17\,500 \text{ сек}^{-5}; \quad G_1 = 45\,600 \text{ сек}^{-4}; \\ G_2 &= 6\,920 \text{ сек}^{-3}; \quad G_3 = 286 \text{ сек}^{-2}. \end{aligned}$$

Из условия обеспечения минимальной длительности переходного процесса и отсутствия перерегулирования выбирается типовое нормированное уравнение [2]:

$$x^5 + 4,04x^4 + 8,03x^3 + 8,07x^2 + 4,43x + 1.$$

Это уравнение характеризуется следующими параметрами:

$$t_{\text{н2}} = 5,9; \quad p\alpha_{\text{ом}} = 29\%; \quad p^2\alpha_{\text{ос}} = 15\%; \quad M = 1,0,$$

где $t_{\text{н2}}$ — нормированная длительность переходного процесса;

M — колебательность;

$p\alpha_{\text{ом}}$, $p^2\alpha_{\text{ос}}$ — характеристики быстрогодействия.

Нормированные коэффициенты характеристического уравнения:

$$A'_4 = 4,04; \quad A'_3 = 8,03; \quad A'_2 = 8,07; \quad A'_1 = 4,43; \quad A'_0 = 1.$$

Корни нормированного характеристического уравнения:

$$x_1 = -0,531; \quad x_{23} = -0,582 \pm j0,582; \quad x_{45} = -1,16 \pm j1,16.$$

Коэффициент нормирования K_B выбирается таким, чтобы исключить корректирование по четвертой производной

$$K_B = \frac{a_4}{A_4} = 6,15 \text{ сек}^{-1}.$$

Тогда коэффициенты желаемого характеристического уравнения

$$\begin{aligned} A_4 &= K_B A'_4 = 24,87 \text{ сек}^{-1}; \quad A_3 = K_B^2 A'_3 = 300 \text{ сек}^{-2}; \\ A_2 &= K_B^3 A'_2 = 1870 \text{ сек}^{-3}; \quad A_1 = K_B^4 A'_1 = 6300 \text{ сек}^{-4}; \\ A_0 &= K_B^5 A'_0 = 8700 \text{ сек}^{-5}. \end{aligned}$$

Действительная длительность переходного процесса

$$t_2 = \frac{t_{п2}}{K_B} = 0,96 \text{ сек}.$$

Корни желаемого характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= x_1 K_B = -3,26; \quad \lambda_{23} = x_{23} K_B = -3,57 \pm \\ &\pm j3,57; \quad \lambda_{45} = x_{45} K_B = -7,15 \pm j7,15. \end{aligned}$$

Коэффициент выхода корректирующих устройств

$$\sigma = \frac{k}{a_5} = 1350 \text{ м/в} \cdot \text{сек}^5.$$

Из уравнения (4) следует:

$$\begin{aligned} \tau''_0 &= \frac{A_0}{\sigma} = 6,48 \text{ в/м}; \quad \tau''_2 = \frac{A_2 - a_2}{\sigma} = 1,25 \text{ в} \cdot \text{сек}^2/\text{м}; \\ \tau''_1 &= \frac{A_1 - a_1}{\sigma} = 4,64 \text{ в} \cdot \text{сек}/\text{м}; \quad \tau''_3 = \frac{A_3 - a_3}{\sigma} = 0,09 \text{ в} \cdot \text{сек}^3/\text{м}; \\ \tau''_4 &= 0. \end{aligned}$$

Следовательно, для получения требуемой степени устойчивости при заданном качестве переходного процесса необходимо осуществить обратную связь по перемещению первой, второй и третьей производной от перемещения объекта.

Первую производную от перемещения объекта можно получить при помощи тахогенератора:

$$U_{\text{вых. ТГ}} = \tau''_1 p x_3;$$

где

$$\tau''_1 = \frac{30 C_{\text{ТГ}} k_R i_R \xi_3 r_3}{\pi (r_3 + r_{\text{ТГ}})};$$

$C_{\text{ТГ}}$ — постоянная тахогенератора;

i_R — передаточное число от тахогенератора к канатоведущему шкиву.

ξ_3 — коэффициент регулировки сопротивления;

$r_{\text{ТГ}}$ — внутреннее сопротивление тахогенератора;

Реализацию выходов по второй и третьей производной можно осуществить, используя, например, обратную связь по силе тока с выходом на

трансформаторный дифференциатор, пропускающий производную от входной величины и саму величину

$$U_{\text{вых}_1} = \xi_1 \tau_{2M}'' \rho^2 x_3 + \frac{\xi_2 k T_d \tau_{2M}'' \rho^3 x_3}{1 + T_d \rho} + \xi_1 \tau_0',$$

где

$$\tau_{2M}'' = \frac{\xi r_0 m_{\text{пр}} R}{i_0 k_M}; \quad \tau_0' = \frac{\xi r_0 M_{\text{ст}}}{k_M};$$

$m_{\text{пр}}$ — приведенная к шкиву масса всех движущихся частей;

i_0 — передаточное число от двигателя к канатоведущему шкиву;

k — коэффициент усиления по напряжению трансформатора;

При $r_0 = 0,0041$ ом; $m_{\text{пр}} = 25\,000$ кг; $\xi = 1$; $\xi_2 = 0,7$; $k = 0,8$; $\tau_{2M}'' = 16,95$ в · сек²/м; $\xi_1 = \frac{\tau_2''}{\tau_{2M}''} = 0,074$;

$$T_d = \frac{\tau_3''}{k \xi_2 \tau_{2M}''} = 0,0095 \text{ сек.}$$

Погрешность за счет члена $1 + T_d$ [2]

$$\Delta = (T_d \omega_M)^2 = (0,0095 \cdot 7,15)^2 = 0,46\%,$$

что приемлемо.

При выполнении всех обратных связей получим требуемую степень устойчивости. Для сравнения был произведен синтез корректирующих устройств частотным методом. В результате синтеза получены довольно сложные корректирующие звенья. Это объясняется тем, что неизменяемая часть ЛАЧХ в области средних частот имеет наклоны в 60 и 100 дБ/дек. Чтобы получить структуру задающего устройства, оценим погрешности в переходном процессе, если задание осуществляется только по пути

(при $V_{\text{max}} = 15$ м/сек; $W_{\text{max}} = 1$ м/сек²; $\left(\frac{dW}{dt}\right)_{\text{max}} = 2$ м/сек³; $\theta_{\text{у. доп}} = 0,1$ м).

Установившаяся погрешность, пропорциональная скорости движения [2],

$$\theta_{y1} = \frac{A_1 V_{\text{max}}}{A_0} = \frac{6300 \cdot 15}{8750} = 10,8 \text{ м,}$$

т. е. необходимо воздействие по скорости с крутизной сигнала

$$\tau_1' = \frac{A_1}{\sigma} = \frac{6300}{1350} = 4,65 \text{ в · сек/м;}$$

погрешность, пропорциональная ускорению,

$$\theta_{y2} = \frac{A_2 W_{\text{max}}}{A_0} = \frac{1870}{8750} = 0,214 \text{ м;}$$

крутизна задающего сигнала по ускорению

$$\tau_2' = \frac{A_2}{\sigma} = \frac{1870}{1350} = 1,38 \text{ в · сек}^2\text{/м;}$$

погрешность, пропорциональная третьей производной (рывку):

$$\theta_{y3} = \frac{A_3 \left(\frac{dx}{dt}\right)_{\text{max}}}{A_0} = \frac{300 \cdot 2}{8750} = 0,068 \text{ м,}$$

т. е. меньше допустимой.

Погрешность по возмущениям:

$$\text{статическая } \theta_{\text{ст}} = \frac{B_0 \Delta x}{A_0} = \frac{14750 \cdot 0,1}{8750} = 0,168 \text{ м};$$

$$\text{ее компенсация } U_{\text{ст}} = \frac{B_0 \Delta x}{a} = \frac{14750 \cdot 0,1}{1350} = 1,096 \text{ в.}$$

Погрешность от производных возмущения находится в пределах допустимой, поэтому $\tau_0'' = \tau_1''' = \tau_2''' = \tau_3''' = 0$. Структурная схема полученной САР приведена на рис. 1, а ее реализация на рис. 2.

Программное задающее устройство II выполнено для трапецеидальной тахограммы.

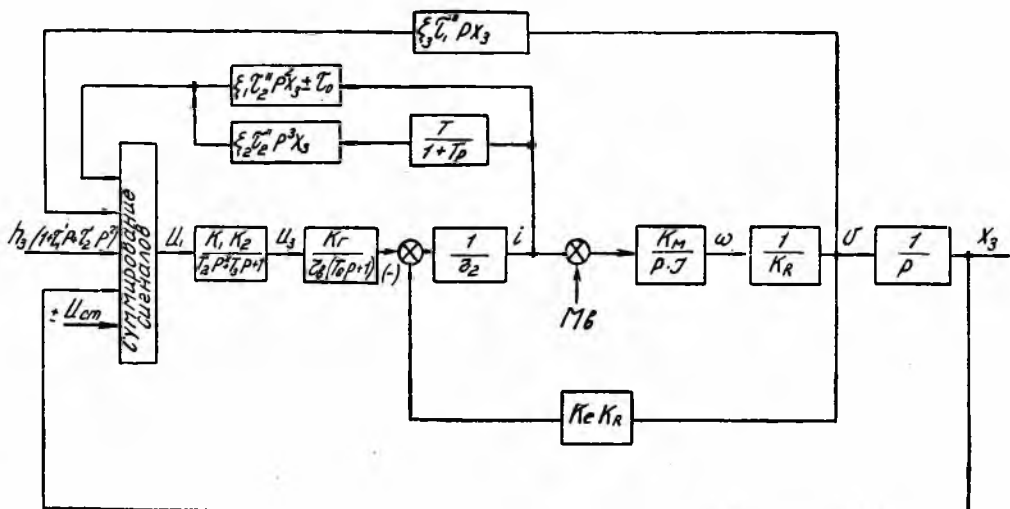


Рис. 1. Структурная схема САР подъемной машины с управлением по пути.

Заданный путь h_3 получается на выходе делителя частоты в виде импульсов, частота следования которых определяется выражением

$$f_{\text{вых}} = \frac{f_{\text{эф}}}{k_1},$$

где $f_{\text{эф}}$ — частота задающего генератора;

k_1 — коэффициент деления.

Число импульсов определяет путь, а частота их следования — скорость. Далее импульсы поступают в схему сравнения пути; сюда же поступают импульсы от датчика пути (например, от магнитомодуляционных датчиков, считывающих магнитные метки на канате).

Разность между числом задаваемых импульсов и импульсов от датчика пути с учетом знака накапливается в регистре рассогласования пути, который управляет преобразователем цифра — аналог I.

На выходе преобразователя получаем напряжение

$$U_{\text{вх}_1} = \tau_0'' (h_3 - x_3).$$

Коэффициенты деления делителя частоты устанавливаются регистром скоростей, на вход которого поступают импульсы от генератора ускорения с частотой, определяемой заданным ускорением. В случае разгона импульсы вычитаются, в случае замедления — суммируются.

При достижении максимальной скорости этот регистр сохраняет значение достигнутой скорости до тех пор, пока не придет импульс «начало замедления».

На выходе преобразователя $U = A \cdot I$ получаем напряжение

$$U_{BX_3} = \tau_1' p x_3.$$

Генератор ускорения выдает сигнал, пропорциональный его частоте, т. е. ускорению:

$$U_{\text{BX}_3} = \tau_2 p^2 x_3.$$

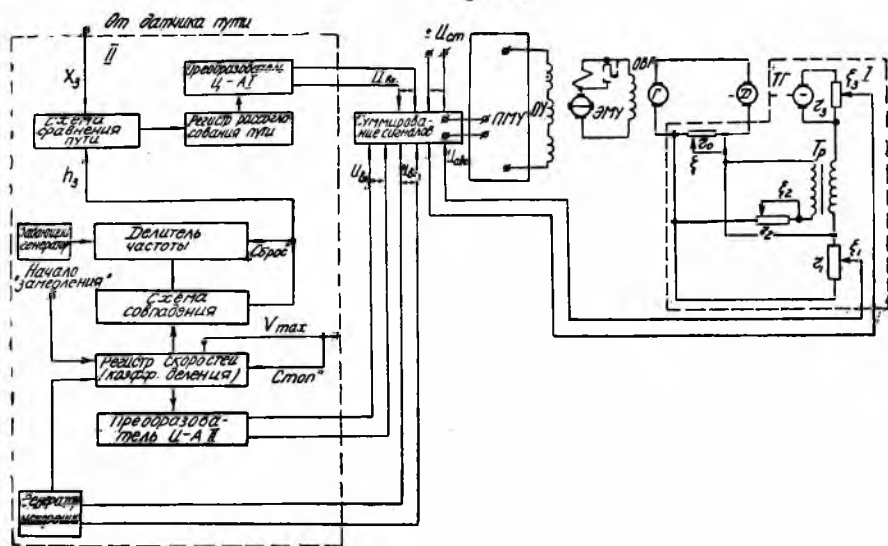


Рис. 2. Схема САР шахтной подъемной машины с приводом по системе Г—Д:
I — блок дифференциаторов объекта; II — программное задающее устройство.

Для получения криволинейной тахограммы ее можно аппроксимировать ломаной, переключая в узлах аппроксимации частоту генератора ускорения.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Тулин. Электропривод и автоматика многоканатных рудничных подъемных машин. Изд-во «Недра», 1964.
2. В. Н. Яворский, А. А. Бессонов, А. И. Коротаев, А. М. Потапов. Проектирование инвариантных следящих приводов. Изд-во «Высшая школа», 1963.
3. Г. Е. Иванченко. Основы теории расчета систем автоматического управления рудничными подъемными машинами. Изд-во «Недра», 1966.