

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА

Э. Г. ФРАНК

(Представлена городской научной конференцией молодых ученых и специалистов)

Электрогидравлические следящие приводы получают все более широкое применение в технике автоматического управления в связи с известными преимуществами электрического управления и гидравлических исполнительных органов [2]. Поэтому изучение динамических свойств электрогидравлических преобразователей и приводов в целом, а также путей их улучшения является актуальным.

В настоящей работе рассматриваются возможности улучшения динамических свойств электрогидравлического преобразователя Г 68—13 и следящего привода с гидродвигателем вращения и обратной связью по положению на основе анализа математической модели динамики привода и экспериментальных исследований.

На рис. 1 приведена схема привода с золотником Г68—13, принцип работы которого известен [1, 3]. Следует лишь сказать, что аналоговая вычислительная машина (АВМ) МН-7 использована здесь для введения ряда корректирующих связей по переменным системы и их производным.

1. Динамические свойства преобразователя Г68—13

Совместное решение уравнения движения подвижных элементов электромеханического преобразователя (ЭМП), уравнения движения четырехкромочного золотника и уравнения неразрывности для магистралей управления с учетом масс подвижных элементов, диссипативных сил, сжимаемости жидкости и податливости трубопроводов после линеаризации разложением в ряд Тейлора дает линейное дифференциальное уравнение четвертого порядка, являющееся математической моделью динамики преобразователя Г68—13

$$T_4 \frac{d^4 y}{dt^4} + T_3 \frac{d^3 y}{dt^3} + T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = Ik, \quad (1)$$

где y — координата четырехкромочного золотника;

I — ток, подведенный к ЭМП.

$$T_1 = \frac{\rho_n f_{и0}}{a} + \frac{2(c_n + K_F P_{y0}) K_{py} W_y f_{и0} P_{y0}}{Q_y a} + \frac{2(c_n + K_F P_{y0}) F_3^2 f_{и0} P_{y0}}{Q_y (c_3 + \beta_3) a} + \\ + \frac{(c_n + K_F P_{y0}) \rho_3 \cdot f_{и0}}{(c_3 + \beta_3) a} + \frac{2 \rho_3 F_{и0} P_{y0} K_n}{(c_3 + \beta_3) a}; \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{m_n f_{н0}}{a} + \frac{2 \rho_n K_{py} W_y f_{н0} P_{y0}}{Q_y a} + \frac{2 \rho_n F_3^2 f_{н0} P_{v0}}{Q_y (c_3 + \beta_3) a} +$$

$$+ \frac{\rho_n \rho_3 f_{н0}}{(c_3 + \beta_3) a} + \frac{2 (c_n + K_F P_{y0}) K_{py} W_y f_{н0} \rho_3 P_{y0}}{Q_y (c_3 + \beta_3) a}, \quad (3)$$

$$T_3 = \frac{2 m_n K_{py} W_y f_{н0} P_{y0}}{Q_y a} + \frac{2 m_n F_3^2 f_{н0} P_{y0}}{Q_y (c_3 + \beta_3) a} +$$

$$+ \frac{m_n \rho_3 f_{н0}}{(c_3 + \beta_3) a} + \frac{2 \rho_n \rho_3 K_{py} W_y f_{н0} P_{v0}}{Q_y (c_3 + \beta_3) a}; \quad (4)$$

$$T_4 = \frac{2 m_n \rho_3 K_{py} W_y f_{н0} P_{y0}}{Q_y (c_3 + \beta_3) a}; \quad (5)$$

$$k = \frac{K_1 \cdot K_n 2 P_{v0} \cdot F_3}{(c_3 + \beta_3) a}. \quad (6)$$

Здесь

$$a = (c_n + K_F P_{y0}) f_{н0} + 2 P_{y0} F_{н0} K_n,$$

c_n — жесткость пружины ЭМП, $c_n = 0,0864$ кг/см;

m_n — масса подвижных элементов ЭМП, $m_n = 1,53 \cdot 10^{-5}$ кгсек²/см;

K_{py} и W_y — коэффициент податливости и объем магистрали управления соответственно, $K_{py} = 2,66 \cdot 10^{-1}$ см²/кг,

$$W_y = 150$$
 см³;

Q_y — расход насоса управления, $Q_y = 53,6$ см³/сек;

P_{y0} — давление в магистрали управления при нейтральном положении золотника, $P_{y0} = 7,5$ кг/см²;

ρ_n и ρ_3 — коэффициенты диссипативных сил в ЭМП и золотнике соответственно, $\rho_n = 1,9 \cdot 10^{-3}$ кгсек/см, $\rho_3 = 6 \cdot 10^{-3}$ кгсек/см;

$f_{н0}$ — площадь рабочего окна игольчатого клапана в нейтральном положении, $f_{н0} = 0,0185$ см²;

$F_{н0}$ — площадь сечения конуса иглы ЭМП, на которую действует давление P_{v0} в нейтральном положении, $F_{н0} = 0,00885$ см²;

K_n — коэффициент пропорциональности приращения площади рабочего окна игольчатого клапана координате иглы, $K_n = 0,167$ см;

K_F — коэффициент пропорциональности приращения площади поперечного сечения конуса иглы, на которую действует давление управления координате иглы, $K_F = 0,145$ см;

F_3 — площадь торца золотника, $F_3 = 2,07$ см²;

c_3 — жесткость пружины золотника, $c_3 = 22$ кг/см;

β_3 — коэффициент, учитывающий гидродинамические силы на золотнике, $\beta_3 = 30$ кг/см;

K_1 — коэффициент пропорциональности тока J в катушке осевой силе, развиваемой ЭМП, $K_1 = 0,57$ кг/а.

Для исследования динамики преобразователя Г68 — 13 частотным методом запишем выражения для логарифмической амплитудной A и фазовой Θ частотных характеристик (ЛАХ и ФЧХ) для уравнения (1) [5]:

$$A = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{(1 - T_2 \omega^2 + T_4 \omega^4)^2 + (T_1 \omega - T_3 \omega^3)^2}, \quad (7)$$

$$\Theta = - \arctg \frac{T_1 \omega - T_3 \omega^3}{1 - T_2 \omega^2 + T_4 \omega^4}, \quad (8)$$

Здесь ω — частота входного воздействия в рад/сек.

Численное решение выражений (7) и (8) с подстановкой параметров преобразователя Г68—13 в выражения (2—6) постоянных времени дало хорошее совпадение с экспериментальными частотными характеристиками в широком диапазоне изменения ряда параметров

(Q_y ; K_{py} ; W_y ; β_3 ; c_n и др.)

Анализ частотных характеристик (7) и (8) показал, что улучшению быстродействия преобразователя Г68—13 способствует:

1. Увеличение численного значения параметров: c_n , Q_y , c_3 , а также угла конуса иглы α (увеличение K_n , K_F , и $F_{и0}$).
2. Уменьшение m_n , F_3 и P_{y0} .
3. Введение отрицательной обратной связи по положению золотника.

Устойчивость преобразователя Г68—13 анализировалась с помощью алгебраического критерия устойчивости Рауса-Гурвица [5], преобразованного к виду, удобному для графической интерпретации:

$$\frac{T_1 T_2}{T_3} > \frac{1}{1 - \frac{T_1 T_4}{T_2 T_3}}. \quad (9)$$

На рис. 2 показано влияние основных параметров преобразователя Г68—13 на область устойчивости в плоскости

$$\frac{T_1 T_2}{T_3} - \frac{T_1 T_4}{T_2 T_3}.$$

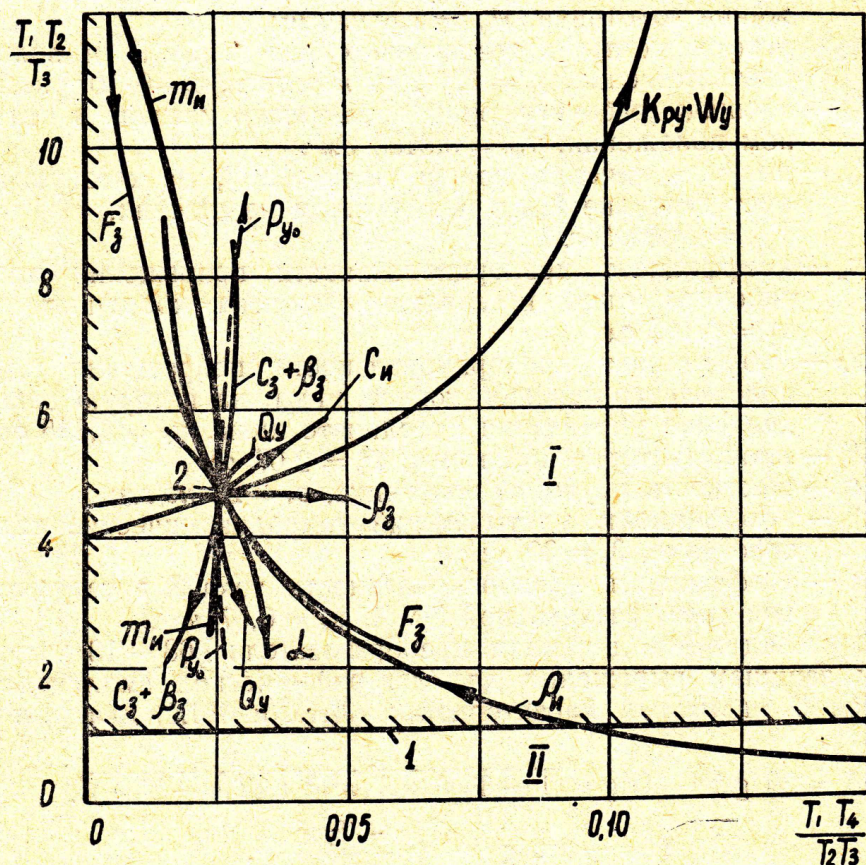


Рис. 2. Влияние параметров преобразователя Г68 на его устойчивость

(Направление стрелок соответствует увеличению значений параметров; точка 2 соответствует значениям параметров преобразователя Г 68 — 13). Большой запас устойчивости преобразователя Г 68 — 13 (точка 2 далеко от границы устойчивости 1) позволяет изменить ряд параметров с целью улучшения частотной характеристики. Так, увеличение $c_{и}$, Q_y , c_3 , α и уменьшение $m_{и}$, а также введение обратной связи по положению золотника в реальном преобразователе увеличило полосу пропускания (быстродействие) на 30% без существенной потери устойчивости.

2. Динамические свойства привода в целом

Математическая модель привода, при ряде допущений [3], может быть представлена линейным дифференциальным уравнением [3]

$$a_4 \frac{d^4 \varphi}{dt^4} + a_3 \frac{d^3 \varphi}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + a_1 \frac{d \varphi}{dt} + \varphi = I \cdot k_1. \quad (10)$$

Здесь φ — координата вала гидромотора;

$a_1 - a_4$ — постоянные времени, зависящие от постоянных параметров привода;

k_1 — статический коэффициент усиления, зависящий главным образом от коэффициента главной обратной связи K_{oc} .

Исследование устойчивости привода приведено в работе [3]. Рассмотрим лишь возможность улучшения его динамических свойств введением дополнительных корректирующих связей.

Введем обратную связь по производным от ошибки (сигнала рассогласования) регулирования

$$I = \pm k_1 \frac{d(I_t - \varphi K_{oc})}{dt} \pm k_2 \frac{d^2(I_t - \varphi K_{oc})}{dt^2} \pm k_3 \frac{d^3(I_t - \varphi K_{oc})}{dt^3} \pm \dots (11)$$

Здесь I_t — входное воздействие;

k_1, k_2 — коэффициенты дополнительных обратных связей.

Тогда уравнение (10) примет вид

$$\begin{aligned} b_4 \frac{d^4 \varphi}{dt^4} + b_3 \frac{d^3 \varphi}{dt^3} + b_2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + b_1 \frac{d \varphi}{dt} + \varphi = \\ = I k_2 \pm \frac{d I_t}{dt} k_3 \pm \frac{d^2 I_t}{dt^2} k_4 \pm \frac{d^3 I_t}{dt^3} k_5 \pm \frac{d^4 I_t}{dt^4} k_6. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $b_1 - b_4$ — новые постоянные времени.

Таким образом, введение обратной связи (11) позволяет изменять постоянные коэффициенты в левой части уравнения (10), определяющие устойчивость и вид ЛАХ и ФЧХ, и, кроме того, позволяют использовать известные преимущества регулирования по производным от сигнала управления [5, 6]. Следует отметить, что введение обратной связи (11) эквивалентно введению обратных связей по четырем производным от координаты вала гидромотора φ и введению четырех производных от сигнала управления I_t . Кроме того, ввиду трудности получения высоких порядков производных в реальных системах, в ряде случаев возможна замена высокого порядка одной переменной системы более низким порядком другой переменной. Так, в гидросистемах при инерционной нагрузке обратная связь по второй производной $\frac{d^2 \varphi}{dt^2}$ от координаты исполнительного двигателя эквивалентна обратной связи по перепаду давления (нагрузке) ΔP на гидродвига-

теле [2]; обратная связь по $\frac{d\varphi}{dt}$ эквивалентна обратной связи по координате золотника y и т. д.

Для проверки изложенного метода коррекции динамических характеристик привода был проведен эксперимент на реальном приводе (рис. 1) совместно с АВМ МН-7, позволивший получить ряд производных от переменных привода y , ΔP , φ , I_t . Для этого неэлектрические переменные y , φ и ΔP были преобразованы в электрические при помощи индуктивного, потенциометрического и тензометрических датчиков соответственно. Производные на МН-7 были воспроизведены известными методами неявных функций [4].

На рис. 3 представлены экспериментальные ЛАХ и ФЧХ без дополнительных обратных связей (штриховые линии) и с положительными

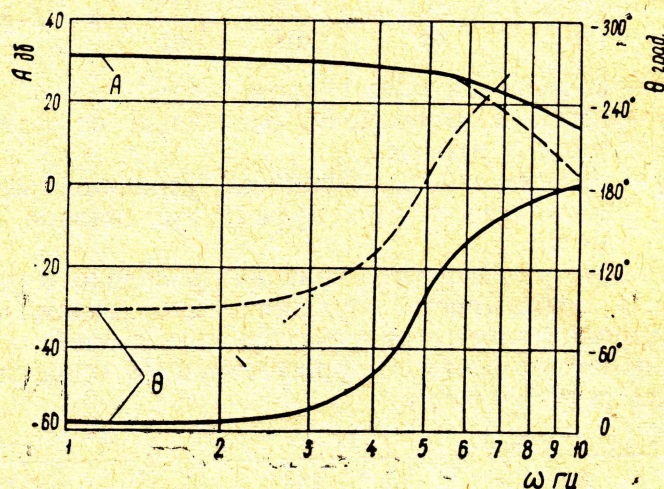


Рис. 3. Экспериментальные ЛАХ и ФЧХ электрогидравлического следящего привода

обратными связями по двум первым производным от сигнала рассогласования $J=J_t$ — φ к_{ос} и отрицательной обратной связью по координате золотника y (сплошные линии). Из рис. 3 видно, что эти обратные связи существенно увеличили запас по фазе (приблизительно на 90° на всем диапазоне частот).

Экспериментальные исследования, проведенные для большого диапазона величин и сочетаний обратных связей, показали, что применение элементов АВМ для коррекции динамических свойств электрогидравлических следящих систем является эффективным средством.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Каменецкий. Следящие золотники для станков с программным управлением. «Станки и инструмент», № 5, 1961.
2. И. М. Красов. Гидравлические элементы в системах управления. «Машиностроение», М., 1967.
3. И. А. Немировский, Э. Г. Франк. Экспериментальное исследование периодического движения с остановками следящего гидропривода. Изв. вузов, «Машиностроение», № 5, М., 1969.
4. Г. Корн, Т. Корн. Электронные аналоговые и аналого-цифровые вычислительные машины. Изд-во «Мир», М., 1967.
5. Е. П. Попов. Автоматическое регулирование и управление. Изд-во «Наука», М., 1966.
6. П. Хэммонд. Теория обратной связи и ее применение. Физматгиз, М., 1961.