

## НАДЗЕЙНАСЦЬ І ДАЎГАВЕЧНАСЦЬ МАШЫН

УДК 681.583.313.2

А. С. ШАГИНЯН, В. В. БОЛОТСКИЙ

### АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ГИДРОУСИЛИТЕЛЕМ ТИПА СОПЛО—ЗАСЛОНКА—ЗОЛОТНИК С УПРУГОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В настоящее время в быстродействующих электрогидравлических следящих системах дроссельного регулирования все более широкое применение получают гидроусилители типа сопло—заслонка—золотник с упругой обратной связью по положению управляющего золотника. Применение гидроусилителей такого типа прежде всего оправдано малой входной мощностью, стабильностью характеристик при изменении температуры, простотой конструкции и надежностью в работе.

В результате разрыва экономических связей после распада СССР на виброисточники сейсмических сигналов, широко используемых при разведке полезных ископаемых, начали устанавливать блоки управления фирмы PELTON (США). Однако они обладают маломощным сигналом на выходе, который недостаточен для применяемых в виброисточниках электрогидравлических преобразователей (ЭГП) с гидроусилителем типа золотник—золотник. Альтернативным вариантом выхода из создавшегося положения является замена ЭГП с гидроусилителем типа золотник—золотник на ЭГП с гидроусилителем типа сопло—заслонка—золотник.

Поскольку динамика виброисточника сейсмических сигналов полностью зависит от параметров и характеристик ЭГП, возникла необходимость исследования динамики ЭГП с гидроусилителем типа сопло—заслонка—золотник. Аналитические исследования ЭГП проведем с учетом гидродинамических сил, действующих на заслонку, сжимаемости жидкости, массы золотника, а также гидродинамической силы и силы вязкого трения, действующих на него. В данной постановке эта проблема до настоящего времени остается малоизученной.

Анализ динамики ЭГП с гидроусилителем типа сопло—заслонка—золотник с упругой обратной связью по положению управляющего золотника проведем на примере ЭГП с гидроусилителем фирмы Moog. В состав ЭГП в рассматриваемом случае входят усилитель сигнала рассогласования и два каскада: управляющий и распределительный. Управляющий состоит из электромеханического преобразователя (ЭМП) электромагнитного типа, гидроусилителя типа сопло—заслонка—золотник с упругой обратной связью по положению управляющего золотника. Распределительный каскад включает в себя распределительный золотник, датчик перемещения распределительного золотника, усилитель сигнала датчика перемещения. Совместная работа управляющего и распределительного каскадов в общем случае описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений.

Для анализа динамики ЭГП составим дифференциальные уравнения применительно к быстродействующей системе, для которой справедливы следующие допущения: зона нечувствительности, утечки рабочей жидкости в диагонали гидроусилителя малы и ими можно пренебречь, все рабочие процессы гидроусилителя протекают в зоне «практически линейных» характеристик гидравлического мостика сопло—заслонка, в которой справедлива линеаризация уравнений расхода [1] и отсутствует ограничение по ходу заслонки. При этих допущениях система уравнений, описывающая движение ЭГП в линейной зоне, запишется в таком виде [2, 3]:

уравнение сил, действующих на якорь ЭМП:

$$m_1 \frac{d^2 h}{dt^2} = k_3 I - C_1 h - f \frac{dh}{dt} - C_2 (h + x) - k_2 S_1 h - k_1 S_1 p_1, \quad (1)$$

где  $m_1$  — приведенная к оси сопел масса якоря, заслонки и жидкости, кг;  $h$  — перемещение заслонки от нейтрального положения, м;  $k_3$  — коэффициент усиления тяговой характеристики ЭМП, Н/А;  $I$  — ток управления на входе ЭМП, А;  $C_1$  — жесткость пружин якоря ЭМП, Н/м;  $f$  — коэффициент вязкого демпфирования якоря и заслонки, кг/с;  $C_2$  — коэффициент жесткости пружины обратной связи, приведенной к оси сопел, Н/м;  $x$  — перемещение управляющего золотника, м;  $S_1$  — площадь поперечного сечения сопла, м<sup>2</sup>;  $k_2$  — коэффициент усиления по перемещению заслонки, Н/м<sup>3</sup>;  $k_1$  — коэффициент усиления по давлению [1];  $p_1$  — давление в диагонали гидравлического мостика гидроусилителя, Н/м<sup>2</sup>;

уравнение расхода в диагонали гидравлического мостика гидроусилителя

$$S_2 \frac{dx}{dt} = k_4 h - k_5 p_1 - \frac{V_1}{2E} \frac{dp_1}{dt}, \quad (2)$$

где  $S_2$  — площадь поперечного сечения управляющего золотника, м<sup>2</sup>;  $k_4$  — коэффициент усиления по перемещению заслонки, м<sup>2</sup>/с;  $k_5$  — коэффициент усиления по давлению, м<sup>5</sup>/(с · Н);  $V_1$  — объем торцевой полости управляющего золотника, м<sup>3</sup>;  $E$  — приведенное значение объемного модуля упругости жидкости, Н/м<sup>2</sup>;

уравнение сил, действующих на управляющий золотник:

$$m_2 \frac{d^2 x}{dt^2} = S_2 p_1 - f_1 \frac{dx}{dt} - C_3 x - C_2 (h + x), \quad (3)$$

где  $m_2$  — масса золотника гидроусилителя, кг;  $f_1$  — коэффициент вязкого трения, кг/с;  $C_3$  — коэффициент гидродинамической жесткости, Н/м;

уравнение расхода распределительного золотника

$$S_3 \frac{dy}{dt} = k_6 x, \quad (4)$$

где  $S_3$  — площадь поперечного сечения распределительного золотника, м<sup>2</sup>;  $y$  — перемещение распределительного золотника, м;  $k_6$  — коэффициент усиления по перемещению управляющего золотника, м<sup>2</sup>/с.

Преобразуем уравнения (1)–(4) по Лапласу при нулевых начальных условиях [4] и получим систему уравнений в изображениях:

$$\left\{ \begin{aligned} (T_2^2 s^2 + 2\zeta_2 T_2 s + 1)h(s) &= \frac{1}{C_1 + C_2 + k_2 S_1} [k_3 I(s) - C_2 x(s) - k_1 S_1 p_1(s)], \\ p_1(s) &= \frac{1}{(T_3 s + 1)} \left[ \frac{k_4}{k_5} h(s) - \frac{S_2}{k_5} s x(s) \right], \\ x(s) &= \frac{(S_2 k_4 - C_2 k_5)(1 - T_{51} s) p_1(s)}{(C_3 + C_2) k_4 (T_5^2 s^2 + 2\zeta_5 T_5 s + 1)}, \\ y(s) &= \frac{k_7}{s} x(s), \end{aligned} \right.$$

где

$$T_2 = \sqrt{\frac{m_1}{C_1 + C_2 + k_2 S_1}}; \quad \zeta_2 = \frac{f}{2\sqrt{(C_1 + C_2 + k_2 S_1)m_1}};$$

$$T_3 = \frac{V_1}{2Ek_5}; \quad T_{51} = \frac{V_1 C_2}{2E(S_2 k_4 - C_2 k_5)};$$

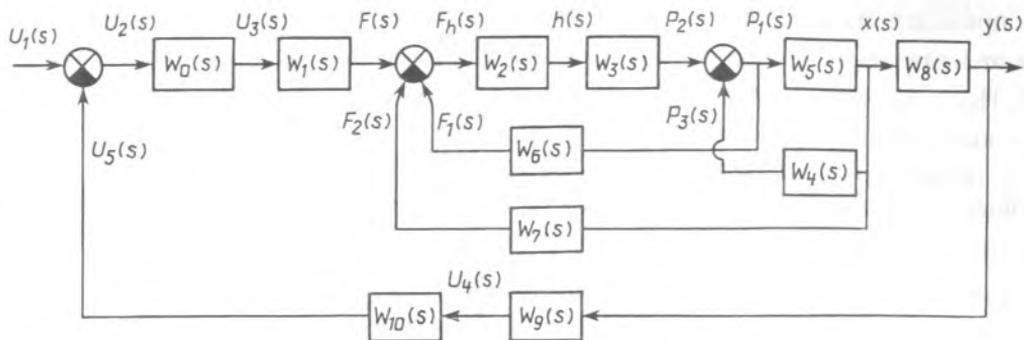


Рис. 1. Структурная схема исследуемого ЭГП

$$T_5 = \sqrt{\frac{m_2}{C_3 + C_2}}; \quad \zeta_5 = \frac{1}{2\sqrt{(C_3 + C_2)m_2}} \left( f_1 + \frac{C_2 S_2}{k_4} \right);$$

$k_7 = k_6/S_3$ ;  $s$  — оператор преобразования по Лапласу;  $T_2, T_3, T_{51}, T_5$  — постоянные времени, с;  $\zeta_2, \zeta_5$  — коэффициенты демпфирования [1].

Система уравнений в изображениях позволяет представить структурную схему ЭГП в виде динамической системы с обратными связями (рис.1). Передаточные функции отдельных звеньев этой системы приобретут следующий вид:

звено усилителя сигнала рассогласования

$$W_0(s) = \frac{U_3(s)}{U_2(s)} = k_0,$$

где  $k_0$  — коэффициент усиления усилителя сигнала рассогласования [1];

звено усиления по силе тяги ЭМП

$$W_1(s) = \frac{F(s)}{U_3(s)} = \frac{k}{Ts + 1}$$

( $k$  — коэффициент усиления по силе тяги ЭМП, Н/В;  $T$  — постоянная времени, с);

звено преобразования результирующей силы тяги в перемещение заслонки

$$W_2(s) = \frac{h(s)}{F_h(s)} = \frac{1}{\frac{C_1 + C_2 + k_2 S_1}{(T_2^2 s^2 + 2\zeta_2 T_2 s + 1)}};$$

звено преобразования перемещения заслонки в давление

$$W_3(s) = \frac{p_2(s)}{h(s)} = \frac{k_4}{k_5(T_3 s + 1)};$$

звено преобразования перемещения управляющего золотника в давление

$$W_4(s) = \frac{p_3(s)}{x(s)} = \frac{S_2}{k_5(T_3 s + 1)} s;$$

звено преобразования давления в диагонали гидравлического мостика гидроусилителя в перемещение управляющего золотника

$$W_5(s) = \frac{x(s)}{p_1(s)} = \frac{(S_2 k_4 - C_2 k_5)(1 - T_{51} s)}{(C_3 + C_2) k_4 (T_5^2 s^2 + 2\zeta_5 T_5 s + 1)};$$

звено преобразования давления в диагонали гидравлического мостика гидроусилителя в силу тяги

$$W_6(s) = \frac{F_1(s)}{p_1(s)} = k_1 S_1;$$

звено преобразования перемещения управляющего золотника в силу тяги

$$W_7(s) = \frac{F_2(s)}{x(s)} = C_2;$$

звено преобразования перемещения управляющего золотника в перемещение распределительного золотника

$$W_8(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k_7}{s};$$

звено датчика перемещения

$$W_9(s) = \frac{U_4(s)}{y(s)} = k_9.$$

Здесь  $k_9$  — коэффициент усиления датчика перемещения, В/м;

звено усилителя сигнала датчика перемещения

$$W_{10}(s) = \frac{U_5(s)}{U_4(s)} = \frac{k_{10}}{T_{10}s + 1}$$

( $k_{10}$  — коэффициент усиления усилителя сигнала датчика перемещения [1];  $T_{10}$  — постоянная времени усилителя сигнала датчика перемещения, с).

Общая передаточная функция этой структурной схемы будет иметь вид

$$W(s) = \frac{y(s)}{U_1(s)} = \frac{W_{012358}(s)}{1 + W_5(s)W_4(s) + W_2(s)W_3(s)W_6(s) + W_2(s)W_3(s)W_5(s)W_7(s) + W_{012358}(s)W_9(s)W_{10}(s)},$$

где  $W_{012358}(s) = W_0(s)W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_5(s)W_8(s)$ .

Подставив в полученное выражение общей передаточной функции  $W(s)$  значение параметров ЭГП и преобразовав его в частотную форму в результате счета на ЭВМ, получим амплитудно-частотную, фазочастотную и переходную характеристики ЭГП (рис. 2, 3).

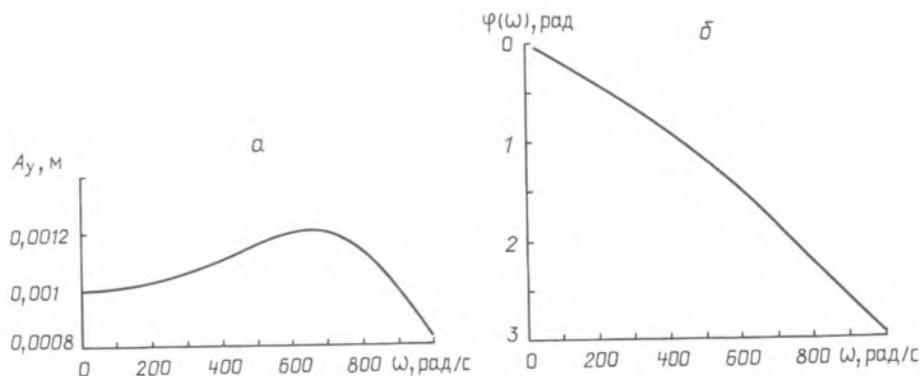


Рис. 2. Частотные характеристики исследуемого ЭГП: а — амплитудная б — фазовая

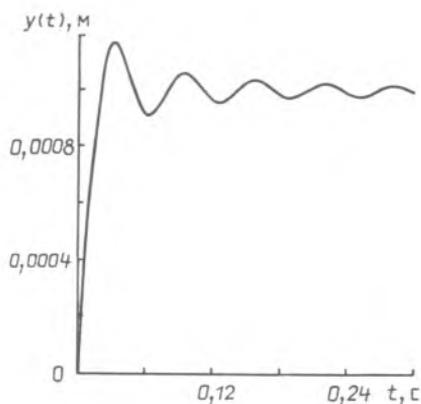


Рис. 3. Переходная характеристика исследуемого ЭГП

Таким образом, анализ графиков, приведенных на рис. 2, 3, свидетельствует о том, что диапазон частот эффективного и устойчивого режима работы ЭГП охватывает рабочий диапазон частот вибрационного источника сейсмических сигналов. Полученные динамические характеристики подтверждают возможность использования гидроусилителя типа сопло—заслонка—золотник в вибрационных источниках сейсмических сигналов.

### Summary

The mathematical model derivation electrohydraulic converter amplifier of nozzle—flapper—spool type with resilient feedback of position manager spool and calculation of basic dynamic characteristics are given here. The possibility of their application in vibration sources of seismic signals is justified here too.

### Литература

1. Г а м ы н и н Н. С., К а м е н и р Я. А., К о р о б о ч к и н Б. Л. и др. Гидравлический следящий привод. М., 1968.
2. Г а м ы н и н Н. С. Гидравлический привод систем управления. М., 1972.
3. Л е щ е н к о В. А. Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением. М., 1975.
4. П о п о в Д. Н. Динамика и регулирования гидро- и пневмосистем. М., 1976.

Гомельский государственный технический университет  
им. П. О. Сухого

Поступила в редакцию  
03.03.98