

УДК 681.583.313.2

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОГО ТРЕНИЯ И ИНЕРЦИОННЫХ СИЛ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А. С. ШАГИНЯН⁺, В. В. БОЛОТСКИЙ, А. В. ЗАХАРОВ

Приводится математическое описание электрогидравлического преобразователя с гидроусилителем типа “сопло–заслонка–золотник” с упругой обратной связью с учетом вязкого трения и инерционных сил и анализируется влияние последних на его динамические характеристики.

Ключевые слова: гидроусилитель, амплитудно- и фазочастотные характеристики, сила вязкого трения, инерционные силы.

Введение. Появление быстродействующих электрогидравлических следящих систем с гидроусилителем (ГУ) типа “сопло–заслонка–золотник” было обусловлено, прежде всего, развитием военной техники (системы автопилотирования самолетов, системы наведения ракет), испытательной техники (универсальные испытательные машины с электрогидравлическим приводом, электрогидравлические вибрационные стенды) и сейсмической техники (создание высокочастотных электрогидравлических сейсмических вибраторов для разведки нефти и газа). Повышение быстродействия в указанных областях техники сопряжено с существенным улучшением их технических и эксплуатационных параметров. В свою очередь решение данной задачи связано с анализом математической модели электрогидравлических систем, составной частью которых является ГУ типа “сопло–заслонка–золотник”.

Аналитические исследования и обсуждение их результатов. Анализ динамики преобразователя электрогидравлического (ПЭГ) с ГУ типа “сопло–заслонка–золотник” с упругой обратной связью по положению управляющего золотника проведем на примере ПЭГ с ГУ фирмы Moog (США).

В состав ПЭГ в рассматриваемом случае входят усилитель сигнала рассогласования и два каскада: управляющий и распределительный.

Управляющий каскад состоит из электромеханического преобразователя (ЭМП) электромагнитного типа ГУ 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.

В ранее проведенных работах по исследованию динамики ПЭГ с ГУ типа “сопло–заслонка–золотник” [1] приводится математическое описание со следующими допущениями: зона нечувствительности, утечки рабочей жидкости в диагонали ГУ малы, и ими можно пренебречь, все рабочие процессы ГУ протекают в зоне “практически линейных” характеристик гидравлического мостика “сопло–заслонка”. Также не учитываются масса золотника и силы вязкого трения. При этих допущениях система уравнений, описывающая движение ПЭГ в линейной зоне запишется в таком виде:

— уравнение сил, действующих на якорь ЭМП:

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого. Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

⁺ Автор, с которым следует вести переписку.

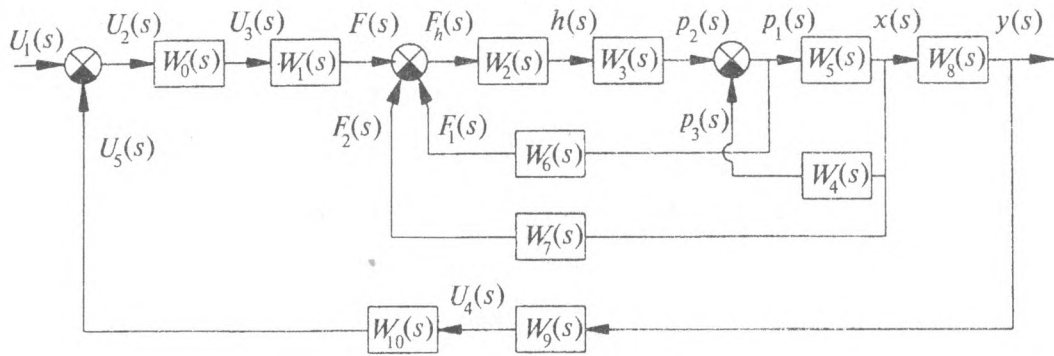


Рис. 1. Структурная схема ПЭГ

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

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, м²; k_2 — коэффициент усиления по перемещению заслонки, Н/м³; k_1 — коэффициент усиления по давлению [1]; p_1 — давление в диагонали гидравлического мостика ГУ, Н/м²;

— уравнение расхода в диагонали гидравлического мостика ГУ имеет вид

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

где S_2 — площадь поперечного сечения управляющего золотника, м²; k_4 — коэффициент усиления по перемещению заслонки, м²/с; k_5 — коэффициент усиления по давлению, м³/сН; V_1 — объем торцевой полости управляющего золотника, м³; E — приведенное значение объемного модуля упругости жидкости, Н/м²;

— уравнение сил, действующих на управляющий золотник:

$$S_2 p_1 = C_3 x + C_2 (h + x), \quad (3)$$

где 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, м²; y — перемещение распределительного золотника, м; k_6 — коэффициент усиления по перемещению управляющего золотника, м²/с.

Как показывают исследования, проведенные в Гомельском государственном техническом университете им. П. О. Сухого, пренебрежение вязким трением управляющего золотника, а также инерционными силами, приложенными к золотнику, не является достаточно строгим и корректным, поэтому в данной работе рассматривается математическая модель ПЭГ с учетом влияния силы вязкого трения и инерционных сил, приложенных к золотнику. Тогда уравнение сил, действующих на управляющий золотник, примет следующий вид:

$$m_2 \frac{d^2 x}{dt^2} = S_2 p_1 - f_1 \frac{dx}{dt} - C_3 x - C_2 (h + x), \quad (5)$$

где m_2 — масса золотника ГУ, кг; f_1 — коэффициент вязкого трения, кг/с.

Преобразуем уравнения (1), (2), (4), (5) по Лапласу при нулевых начальных условиях [2] 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

$$T_2 = \sqrt{\frac{m_1}{C_1 + C_2 + k_2 S_1}}; \quad \zeta_2 = \frac{f}{2\sqrt{(C_1 + C_2 + k_2 S_1)m_1}}; \quad T_{51} = \frac{V_1 C_2}{2E(S_2 k_4 - C_2 k_5)}; \quad T_5 = \sqrt{\frac{m_2}{C_3 + C_2}}; \quad T_3 = \frac{V_1}{2Ek_5};$$

$$\zeta_5 = \frac{1}{2\sqrt{(C_3 + C_2)m_2}} \left(f_1 + \frac{C_2 S_2}{k_4} \right); \quad k_7 = \frac{k_6}{S_3};$$

s — оператор преобразования по Лапласу; T_2, T_3, T_{51}, T_5 — постоянные времени, с; ζ_2, ζ_5 — коэффициенты демпфирования [1].

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

— звено усилителя сигнала рассогласования:

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

где U_2 — напряжение на входе усилителя сигнала рассогласования, В; U_3 — напряжение на выходе усилителя сигнала рассогласования, В; k_0 — коэффициент усиления усилителя сигнала рассогласования [1];

— звено усиления по силе тяги ЭМП

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

где F — тяговое усилие ЭМП без нагрузки, Н; k — коэффициент усиления по силе тяги ЭМП, Н/В; T — постоянная времени, с;

— звено преобразования результирующей силы тяги в перемещение заслонки

$$W_2(s) = \frac{h(s)}{F_h(s)} = \frac{1}{(T_2^2 s^2 + 2\zeta_2 T_2 s + 1)},$$

где F_h — результирующая сила тяги, действующая на заслонку, Н; h — перемещение заслонки, м;
 — звено преобразования перемещения заслонки и давление в диагонали гидравлического мостика ГУ без учета его потерь

$$W_3(s) = \frac{p_2(s)}{h(s)} = \frac{k_4}{k_5(T_3s + 1)},$$

где p_2 — давление в диагонали гидравлического мостика ГУ без учета его потерь, Н/м²;
 — звено потерь давления в ГУ

$$W_4(s) = \frac{p_3(s)}{x(s)} = \frac{S_2}{k_5(T_3s + 1)} s,$$

где p_3 — потери давления в ГУ, Н/м²; x — перемещение управляющего золотника, м;
 — звено преобразования давления в диагонали гидравлического мостика ГУ в перемещение управляющего золотника

$$W_5(s) = \frac{x(s)}{p_1(s)} = \frac{(S_2k_4 - C_2k_5)(1 - T_5s)}{(C_3 + C_2)k_4(T_5^2s^2 + 2\zeta_5T_5s + 1)},$$

где p_1 — давление в диагонали гидравлического мостика ГУ, Н/м²;
 — звено потерь тягового усилия ЭМП от действия гидродинамических сил на заслонку

$$W_6(s) = \frac{F_1(s)}{p_1(s)} = k_1S_1,$$

где F_1 — потери тягового усилия ЭМП от действия гидродинамических сил на заслонку, Н;
 — звено потерь тягового усилия ЭМП от действия упругой механической обратной связи на заслонку

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

где F_2 — потери тягового усилия ЭМП от действия упругой механической обратной связи на заслонку, Н;
 — звено преобразования перемещения управляющего золотника в перемещение распределительного золотника

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

где y — перемещение распределительного золотника, м;
 — звено датчика перемещения

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

где U_4 — напряжение на выходе датчика перемещения, В; k_9 — коэффициент усиления датчика перемещения, В/м;
 — звено усилителя сигнала датчика перемещения

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

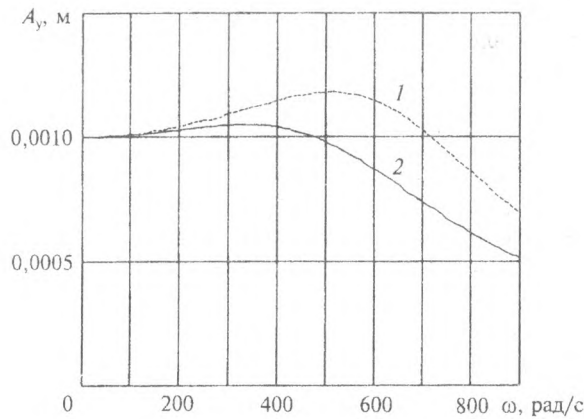


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики ПЭГ: 1 — с учетом вязкого трения и инерционных сил золотника; 2 — без учета

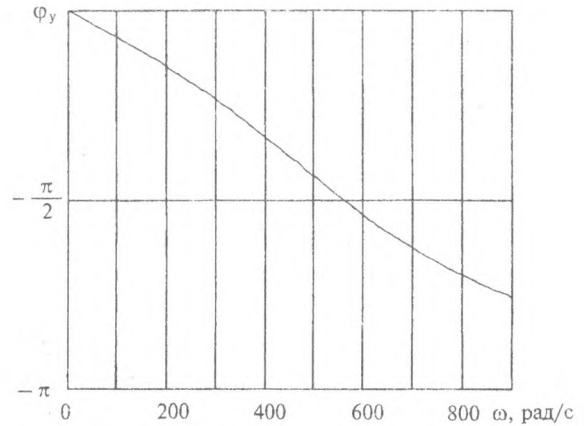


Рис. 3. Фазово-частотная характеристика ПЭГ

где U_5 — напряжение на выходе усилителя сигнала датчика перемещения, В; 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

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

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 ПЭГ и преобразовав его в частотную форму, получим амплитудно- и фазочастотную характеристики ПЭГ (рис. 2, а; 3).

Проводя аналогичные преобразования с уравнениями (1—4) можно получить амплитудно- и фазочастотную характеристики ПЭГ без учета вязкого трения и инерционных сил управляющего золотника (рис. 2, б; 3).

Заключение. Анализируя зависимости на рис. 2, 3 можно сделать следующие выводы.

1. Сила вязкого трения и инерционные силы на управляющем золотнике оказывают существенное влияние на амплитудно-частотную характеристику, особенно на высоких частотах.

2. При проектировании ГУ типа “сопло—заслонка—золотник” с упругой обратной связью необходимо в математической модели учитывать влияние указанных в п. 1 факторов.

3. Наши исследования показали, что с учетом тенденций современной сейсморазведки нефти и газа с применением сейсмических вибраторов на существенное расширение частотного диапазона и значительное увеличение мощности излучения, ГУ типа “сопло—заслонка—золотник” могут использоваться в электрогидравлических системах сеймовибраторов.

Обозначения

m_1 — масса якоря, заслонки и жидкости, приведенная к оси сопел; h — перемещение заслонки от нейтрального положения; k_3 — коэффициент усиления тяговой характеристики ЭМП; I — ток управления на входе ЭМП; C_1 — жесткость пружин якоря ЭМП; f — коэффициент вязкого демпфирования якоря и заслонки; C_2 — коэффициент жесткости пружины обратной связи, приведенной к оси сопел; x, y — перемещение управляющего и распределительного золотников; S_1 — площадь поперечного сечения сопла; k_2 — коэффициент усиления по перемещению заслонки; k_1 — коэффициент усиления по давлению; p_1 — давление в диагонали гидравлического мостика ГУ; S_2 —

площадь поперечного сечения управляющего золотника; k_4 — коэффициент усиления по перемещению заслонки; k_5 — коэффициент усиления по давлению; V_1 — объем торцевой полости управляющего золотника; E — приведенное значение объемного модуля упругости жидкости; C_3 — коэффициент гидродинамической жесткости; S_3 — площадь поперечного сечения распределительного золотника; k_6 — коэффициент усиления по перемещению управляющего золотника; m_2 — масса золотника ГУ; f_1 — коэффициент вязкого трения; s — оператор преобразования по Лапласу; T, T_{1-5}, T_{31} — постоянные времени; ζ_2, ζ_5 — коэффициенты демпфирования; U_1 — задающий сигнал; U_2 — напряжение на входе усилителя сигнала рассогласования; U_3 — напряжение на выходе усилителя сигнала рассогласования; k_0 — коэффициент усиления усилителя сигнала рассогласования; F — тяговое усилие ЭМП без нагрузки; k — коэффициент усиления по силе тяги ЭМП; W — передаточные функции отдельных звеньев; F_h — результирующая сила тяги, действующая на заслонку; p_2 — давление в диагонали гидравлического мостика ГУ без учета его потерь; p_3 — потери давления в ГУ; F_1 — потери тягового усилия ЭМП от действия гидродинамических сил на заслонку; F_2 — потери тягового усилия ЭМП от действия упругой механической обратной связи на заслонку; U_4 — напряжение на выходе датчика перемещения; k_9 — коэффициент усиления датчика перемещения; U_5 — напряжение на выходе усилителя сигнала датчика перемещения; k_{10} — коэффициент усиления усилителя сигнала датчика перемещения; T_{10} — постоянная времени усилителя сигнала датчика перемещения.

Литература

1. Гамынин Н. С., Каменир Я. А., Коробочкин Б. Л. и др. Гидравлический следящий привод. М.: Машиностроение (1968), 563
2. Попов Д. Н. Динамика и регулирования гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение (1976), 423

Поступила в редакцию 07.12.98.

Shaginian A. S., Bolotsky V. V., Zaharov A. V. Analysis of the effect of viscous friction and forces of inertia upon the dynamic performance of the electrohydraulic converter.

The electrohydraulic converter with the hydrobooster of the "nozzle-gate-slide valve" type with a resilient feedback is described mathematically with the consideration of viscous friction and forces of inertia and their effect upon the dynamic performance.