

П. Ю. Волков, С. Б. Демин, В. В. Регода

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ С МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Рассмотрена математическая модель двухкаскадного электрогидравлического усилителя сопло–заслонка с магнитострикционным преобразователем повышенной точности в первом каскаде усиления, который может использоваться в составе типовых электрогидравлических приводов гидрофицированного технологического оборудования.

Введение

Электрогидравлические усилители широко используются в гидрофицированных приводах технологического оборудования, что объясняется известными преимуществами гидropередач [1, 2]: значительные развиваемые усилия, высокое быстродействие, малая инерционность и т.д. В настоящее время наиболее распространены двухкаскадные электрогидравлические усилители сопло–заслонка с мостовой схемой включения. Улучшение показателей качества таких устройств возможно за счет использования более совершенных конструкций электромеханических преобразователей.

Указанным требованиям удовлетворяют электрогидравлические усилители, построенные на базе магнитострикционных электромеханических преобразователей (МЭМП) [3].

1. Магнитострикционные электромеханические преобразователи повышенной точности в электрогидравлических усилителях

Ввиду простоты конструкции [3] МЭМП являются весьма надежными устройствами с более длительным сроком эксплуатации, чем «традиционные» электромагнитные преобразователи. Отсутствие люфтов в механизме позиционирования заслонки выгодно отличает МЭМП от пьезоэлектрических аналогов. Магнитострикционные преобразователи имеют высокое быстродействие (т.к. скорость магнитострикционной деформации сопоставима со скоростью распространения электромагнитной волны в магнитострикционном материале, т.е. около $5 \cdot 10^3$ м/с) и высокую линейность статических характеристик. Однако к настоящему времени широкого распространения в составе электрогидравлических усилителей данный тип устройств не нашел.

В наибольшей степени это объясняется тремя причинами:

- 1) малыми величинами магнитострикционных деформаций;
- 2) значительными линейными размерами магнитострикционных элементов;
- 3) смещением рабочей точки МЭМП вследствие температурных деформаций, что влияет на статические характеристики устройства при мостовой схеме включения.

Кривые 1, 2 на рисунке 1 представляют собой статические характеристики МЭМП, измеренные через 1 мин и через 6 мин после включения преобразователя соответственно. Использовался линейный I-образный магнитострикци-

онный элемент из пермаллоя с длиной рабочего участка 300 мм. Как следует из рисунка 1, произошло смещение рабочей точки МЭМП (т.е. кривая 2 смещена относительно кривой 1 на величину температурной деформации), что обусловлено сопоставимостью магнитострикционных деформаций с тепловым расширением стержня. Для устранения указанного недостатка требуется или вводить в конструкцию электрическую обратную связь по положению магнитострикционного элемента, или заранее просчитывать возможные тепловые деформации стержня и соответствующим образом выставлять магнитострикционный элемент, что не всегда удобно. Указанные недостатки ограничивают область применения МЭМП и снижают эффективность их применения.

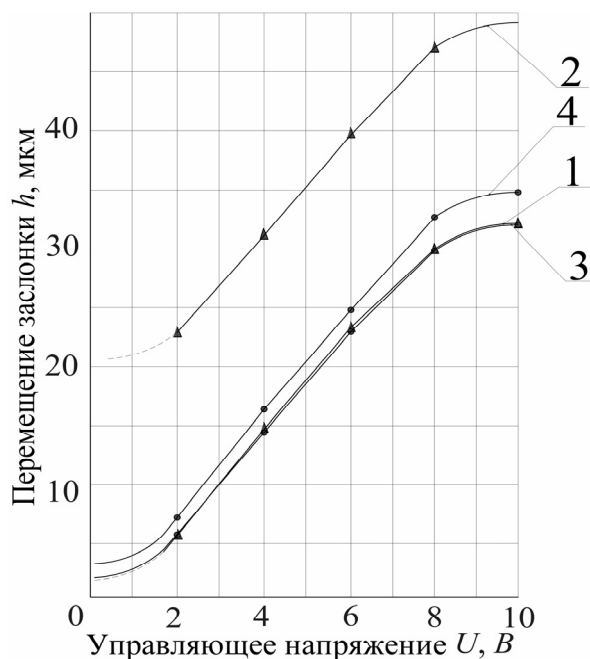


Рис. 1 Статическая характеристика МЭМП

Авторами предлагается конструкция электрогидравлического усилителя, в котором использован П-образный МЭМП с компенсацией температурных деформаций [4], позволяющий скомпенсировать температурные деформации и получить в два раза большее перемещение при меньших линейных размерах. Статическая характеристика П-образного МЭМП с длиной плеча 200 мм показана на рисунке 1 (кривые 3, 4). Из рисунка видно, что П-образный магнитострикционный элемент обеспечивает большую точность позиционирования за счет компенсации температурной деформации [4]. Гистерезис магнитострикционной деформации в данном случае не превышал 0,6%. П-образная конструкция позволяет в два раза снизить линейные размеры исполнительного элемента, при том что результирующее перемещение остается как у I-образного стержня. Эксперименты показали, что начальное положение заслонки (т.е. рабочей точки) изменится на величину 2 мкм, что почти в 8 раз меньше, чем у I-образного элемента. На основании вышесказанного можно сделать вывод о возможности применения П-образных магнитострикционных элементов для позиционирования заслонки в МЭГУ.

2. Математическая модель магнитоэлектрического электрогидравлического усилителя

Рассмотрим магнитоэлектрический электрогидравлический усилитель (МЭГУ), выполненный по мостовой схеме, принципиальная схема которого показана на рисунке 2.

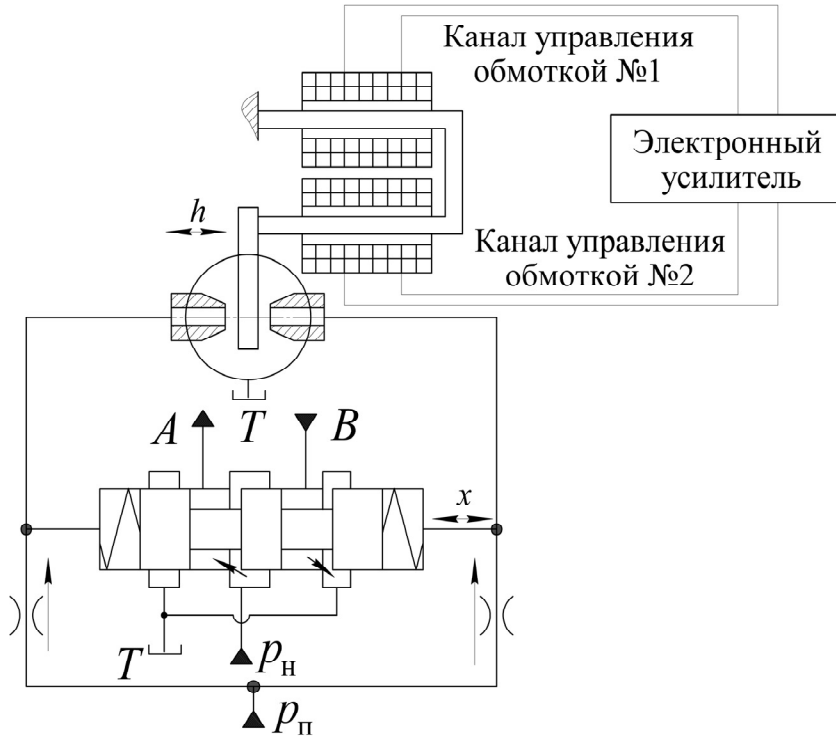


Рис. 2 Принципиальная схема магнитоэлектрического электрогидравлического усилителя: A, B – исполнительные гидролинии, T – слив

Данный МЭГУ содержит два каскада усиления: управляющий каскад с регулируемым дросселем сопло–заслонка и исполнительный каскад с золотниковым распределительным элементом. Для создания математической модели выведем уравнение передаточной функции МЭГУ.

Для этого разобьем электрогидравлический усилитель как объект исследования на отдельные звенья и рассмотрим последовательно каждое из них в соответствии со структурной схемой МЭГУ, показанной на рисунке 3.

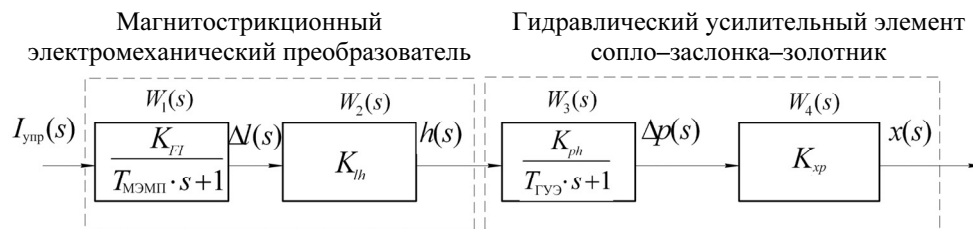


Рис. 3 Структурная схема МЭГУ

Передаточную функцию МЭМП можно представить выражением

$$W_1(s) = \frac{\Delta l(s)}{I_{\text{упр}}(s)} = \frac{K_{FI}}{T_{\text{МЭМП}}s + 1}, \quad (1)$$

где Δl – магнитострикционная деформация; $I_{\text{упр}}$ – управляющий электрический сигнал; K_{FI} – коэффициент усиления по токовому сигналу; $T_{\text{МЭМП}}$ – электромеханическая постоянная магнитострикционного преобразователя, определяемая как отношение индуктивности L к активному сопротивлению R обмотки управления.

Для увеличения магнитострикционной деформации Δl могут использоваться различные промежуточные звенья. Поэтому необходимо добавить передаточную функцию элемента механической связи, которая представляет собой пропорциональное звено, связывающее величину перемещения заслонки h и магнитострикционную деформацию Δl . В операторной форме выражение будет иметь вид

$$W_2(s) = \frac{h(s)}{\Delta l(s)} = K_{hl}. \quad (2)$$

При выводе уравнений движения для гидравлического усилительно-го элемента (ГУЭ), выполненного по мостовой схеме, будем руководствоваться методикой, изложенной в [1, 2], при следующих общепринятых допущениях: массой золотника, его трением и утечками жидкости можно пренебречь. Тогда уравнение сил, действующих на золотник, можно представить в виде

$$S_3 p_d = (C_{\text{пр}} + C_{\text{гд}})x, \quad (3)$$

где S_3 – площадь поперечного сечения торца золотника; p_d – перепад давления под торцами золотника исполнительного каскада; $C_{\text{пр}}$ – коэффициент жесткости центрирующих пружин; $C_{\text{гд}}$ – коэффициент жесткости гидродинамической силы; x – смещение золотника от начального положения. Уравнение расхода жидкости в диагонали мостовой схемы [2]:

$$Q_d = K_{Qh}h - K_{Qp}p_d = Q_X + Q_{\text{дм}}, \quad (4)$$

где $Q_X = S_3 \frac{dx}{dt}$ – расход жидкости, идущий на перемещение золотника;

$Q_{\text{дм}} = \frac{V}{2E} \frac{dp_d}{dt}$ – расход, идущий на компенсацию деформации объема V жидкости в камере за торцом золотника и магистрали, идущей от постоянного дросселя к сопло-заслонке при приведенном значении объемного модуля упругости E . Выражение (4) можно представить в виде

$$K_{Qh}h - K_{Qp}p_d = S_3 \frac{dx}{dt} + \frac{V}{2E} \frac{dp_d}{dt}, \quad (5)$$

где $K_{Qh} \approx Q_c/h_0$ – коэффициент усиления по расходу Q_c жидкости через сопло при среднем положении h_0 заслонки; $K_{Qp} \approx Q_c/p_{\text{п}}$ – коэффициент

усиления по давлению-расходу, где $p_{\text{п}}$ – подведенное давление. Совместное решение уравнений (3) и (5) позволяет получить линеаризованное уравнение ГУЭ:

$$\left(\frac{S_3^2}{K_{Qp}(C_{\text{пр}} + C_{\text{гд}})} + \frac{V}{2EK_{Qp}} \right) \frac{dx}{dt} + x = \frac{K_{Qh}S_3}{K_{Qp}(C_{\text{пр}} + C_{\text{гд}})} h, \quad (6)$$

Выполнив преобразование Лапласа для выражения (6) при нулевых начальных условиях, получим передаточную функцию для ГУЭ сопло–заслонка–золотник:

$$W_{\text{ГУЭ}}(s) = \frac{x(s)}{h(s)} = \frac{K_{ph}}{\left(\left(\frac{S_3^2}{K_{Qp}(C_{\text{пр}} + C_{\text{гд}})} + \frac{V}{2EK_{Qp}} \right) s + 1 \right)} \cdot \frac{S_3}{(C_{\text{пр}} + C_{\text{гд}})}, \quad (7)$$

где K_{ph} – коэффициент усиления по давлению. Введем обозначения:

$$T_{\text{ГУЭ}} = \frac{S_3^2}{K_{Qp}(C_{\text{пр}} + C_{\text{гд}})} + \frac{V}{2EK_{Qp}}; \quad (8)$$

$$K_{xp} = \frac{S_3}{(C_{\text{пр}} + C_{\text{гд}})}. \quad (9)$$

Тогда передаточную функцию ГУЭ можно представить в виде

$$W_{\text{ГУЭ}}(s) = W_3(s)W_4(s) = \frac{K_{ph}}{(T_{\text{ГУЭ}}s + 1)} K_{xp}, \quad (10)$$

где $W_3(s) = \frac{K_{ph}}{(T_{\text{ГУЭ}}s + 1)}$ – передаточная функция дросселя сопло–заслонка в управляющем каскаде; $W_4(s) = K_{xp}$ – передаточная функция золотникового элемента в исполнительном каскаде.

Передаточная функция МЭГУ с учетом выражений (1), (2), (10) будет иметь вид

$$W_{\text{МЭГУ}}(s) = W_1(s)W_2(s)W_3(s)W_4(s) = \frac{K_{Fl}K_{hl}K_{ph}K_{xp}}{(T_{\text{МЭМП}}s + 1)(T_{\text{ГУЭ}}s + 1)}. \quad (11)$$

Введем обозначения:

$$K_{\text{МЭГУ}} = K_{Fl}K_{hl}K_{ph}K_{xp}, \quad T_{\text{МЭГУ}} = \sqrt{T_{\text{МЭМП}} T_{\text{ГУЭ}}};$$

$$\xi = \frac{T_{\text{МЭМП}} + T_{\text{ГУЭ}}}{2\sqrt{T_{\text{МЭМП}} T_{\text{ГУЭ}}}},$$

где $K_{\text{МЭГУ}}$ – коэффициент усиления МЭГУ; $T_{\text{МЭГУ}}$ – постоянная времени всего устройства.

Окончательно

$$W_{\text{МЭГУ}}(s) = \frac{K_{\text{МЭГУ}}}{T_{\text{МЭГУ}}^2 s^2 + 2\xi T_{\text{МЭГУ}} s + 1}. \quad (12)$$

Полученная передаточная функция может использоваться для анализа динамических характеристик МЭГУ.

Список литературы

1. **Лещенко, В. А.** Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением / В. А. Лещенко. – М. : Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. **Гамынин, Н. С.** Гидравлический следящий привод / Н. С. Гамынин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1968. – 564 с.
3. **Волков, П. Ю.** Магнитострикционные электромеханические преобразователи гидрофицированного технологического оборудования / П. Ю. Волков // Проблемы исследования и проектирования машин : сборник статей международной научно-технической конференции. – Пенза : ПДЗ, 2006. – С. 51–53.
4. Патент № 2293888 Российская Федерация, МПК7 F15B 3/00, Магнитострикционный электрогидравлический усилитель / П. Ю. Волков, С. Б. Демин ; заявитель и патентообладатель Пензенский гос. университет. – № 2005116619/06 ; заявл. 31.05.2005 ; опубл. 20.02.07, Бюл. № 5.