

УДК 621.646:537.84(088.8)

Э. А. Зальцгендлер, А. В. Коломенцев, В. И. Кордонский,  
Л. С. Мадорский, Н. А. Столбанов, М. К. Хаджинов

## МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Эффективное использование достоинств электрических и гидравлических устройств автоматики путем их оптимального сочетания в большинстве случаев ограничивается отсутствием качественных и дешевых электрогидравлических преобразователей. Традиционная стыковка электрических и гидравлических каналов посредством механических промежуточных передач имеет ряд существенных недостатков из-за неразрешимо противоречивых требований, которые предъявляют к этому звену электрическая и гидравлическая части системы.

Очевидно, что наиболее перспективное направление — это непосредственная стыковка электрического и гидравлического компонентов без какой-либо подвижной механики [1]. Широкие возможности в этом плане открывает использование магнитореологического эффекта (МРЭ) — обратимого изменения механических свойств (вязкости, пластичности, упругости) магнитореологических суспензий (МРС) под воздействием магнитных полей. Технология МРС и их физические свойства достаточно подробно описаны в [2].

Рассмотрим вопросы конструирования электрогидравлического преобразователя, функционирующего на основе МРЭ, — магнитореологического дросселя (МР-дроссель). МР-дроссель в общем случае представляет собой гидравлический канал, расположенный в индукторе магнитного поля, напряженность которого изменяется в соответствии с управляющим электрическим сигналом. Важным отличительным признаком подобных преобразователей является не только отсутствие подвижных механических элементов, но и предельная простота конструкции и технологии.

При разработке МР-дросселя необходимо учитывать следующие требования:

1. Направление течения МРС в канале и направление магнитного поля должны быть взаимно перпендикулярны.

2. Градиент магнитного поля на входных участках канала не должен превышать некоторого критического значения, чтобы не создавать условий для разложения МРС.

3. Во всем диапазоне рабочих расходов МР-дроссель должен обеспечивать требуемый динамический диапазон регулируемых перепадов давления:

$$D = \frac{\Delta p_m}{\Delta p_{\min}} \geq D_{\tau}. \quad (1)$$

4. Максимальное приращение перепада давления под воздействием магнитного поля должно быть не менее требуемого:

$$\Delta p_{Im} \geq \Delta p_{\tau}. \quad (2)$$

5. Динамические характеристики индуктора не должны ограничивать динамику преобразователя:

$$\frac{dI}{dt_m} = \frac{U_{\pi} - I_m R}{L} \geq \frac{dI}{dt_{\tau}}, \quad (3)$$

где  $I$ ,  $R$  и  $L$  — ток, активное сопротивление и индуктивность обмотки индуктора;  $U_{\pi}$  — напряжение источника питания.

6. Максимальный ток индуктора должен соответствовать параметрам доступной элементной базы:

$$I_m \leq I_d. \quad (4)$$

7. МР-дроссель должен иметь требуемые энергетические показатели:

$$\kappa = \frac{\Delta p_I Q}{\Delta p Q + I^2 R \kappa_y^{-1}}, \quad (5)$$

где  $Q$  — объемный расход МРС через дроссель;  $\Delta p = \Delta p_I + \Delta p_0$  — перепад давления на дросселе;  $\kappa_y$  — коэффициент полезного действия усилителя, используемого для управления током индуктора.

Точный расчет расходной характеристики МР-дросселя является довольно сложной задачей. Зависимость вязкости по сечению канала от взаимной ориентации магнитного и сдвигового полей практически исключает возможность получения результата в замкнутой форме, а применение численных методов и ЭВМ малоэффективно на первых этапах проектирования ввиду необозримости получаемых результатов. В то же время для предварительного расчета конструктивных параметров МР-дросселя достаточно оценить его основные показатели при двух типовых режимах работы: режиме полного запираия ( $Q=0$ :  $\min \Delta p_{Im} \geq \Delta p_T$ ) и режиме максимального расхода ( $Q=Q_m$ :  $D \geq D_T$ ,  $\kappa \geq \kappa_T$ ). В этом случае можно получить соотношения между конструктивными параметрами и основными показателями в замкнутой форме с достаточной для инженерной практики точностью за счет использования обычных реологических моделей. Проиллюстрируем данный подход на примере расчета дросселя с прямоугольным щелевым каналом (щелевая форма канала является предпочтительной, так как обеспечивает сдвиговое деформирование преимущественно в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля).

Реологическое уравнение, достаточно точно описывающее механические свойства МРС, имеет следующий вид [3]:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + KH^2, \quad (6)$$

где  $\eta$  — вязкость дисперсионной среды;  $\dot{\gamma}$  — градиент скорости;  $K$  — коэффициент, зависящий в общем случае от  $\dot{\gamma}$ ,  $H$ , а также от концентрации и магнитной восприимчивости дисперсной фазы.

Из (6) и уравнения баланса сил на стенках канала имеем перепад давления в режиме полного запираия ( $\dot{\gamma}=0$ ):

$$\min_Q \Delta p_I = 2KH^2 l/h. \quad (7)$$

Для режима максимальных расходов требуемые соотношения получим исходя из кусочно-линейной аппроксимации (6):

$$\tau = \begin{cases} \tau_{01} + \eta \dot{\gamma} & \text{при } \tau \geq \tau_k, \\ \tau_0 + \eta_1 \dot{\gamma} & \text{при } \tau < \tau_k, \end{cases}$$

где  $\tau_{01}$  и  $\tau_0$  — динамический и истинный пределы текучести МРС.

С учетом закона распределения касательных напряжений по сечению канала длиной  $l$ :  $\tau = \Delta p x/l$ , при выполнении условий  $b \gg h$  ( $b$  и  $h$  — ширина и высота канала) и  $\Delta p \geq 2l\tau_k/h$  путем двойного интегрирования  $\dot{\gamma}$  по сечению канала получаем расходную характеристику:

$$Q = b \left\{ \frac{\Delta p h^3}{12l\eta} - \frac{\tau_{01} h^2}{4\eta} + \frac{l^2}{3\Delta p^2 \eta} [\tau_{01}^3 + (\tau_{01} - \tau_0) (\tau_k - \tau_{01}) (\tau_k + \tau_{01} + \tau_0)] \right\}.$$

Отсюда при допущении о ньютоновском характере течения МРС в отсутствие магнитного поля имеем приращение перепада давления при постоянном расходе:

$$\Delta p_I = \frac{3l\tau_{01}}{h} - \frac{4l^3}{h^3 \Delta p^2} [\tau_{01}^3 + (\tau_{01} - \tau_0) (\tau_k - \tau_{01}) (\tau_k + \tau_{01} + \tau_0)]. \quad (8)$$

Верхнюю оценку относительной погрешности, обусловленной аппроксимацией реального реологического уравнения, можно получить из сравнения с соответствующей величиной, рассчитанной по модели Шведова—Бингама ( $\tau = \tau_{01} + \eta \dot{\gamma}$ ):

$$\text{SUP} \frac{\delta \Delta p_I}{\Delta p} \leq \frac{4l^3}{h^3 \Delta p^3} (\tau_{01} - \tau_0) (\tau_K - \tau_{01}) (\tau_K + \tau_{01} + \tau_0).$$

При  $\Delta p \gg 2l[\tau_{01}^2 + (1 - \tau_0/\tau_{01})(\tau_K - \tau_{01})(\tau_K + \tau_{01} + \tau_0)]^{1/2}/\sqrt{3}h$  соотношение (8) принимает вид

$$\Delta p_I \approx \frac{3l\tau_{01}}{h}. \quad (9)$$

С учетом (9) соответствующие показатели МР-дресселя определяются в виде

$$D = \frac{bh^2KH^2}{4\eta Q} + 1; \quad \kappa = \left( \frac{4\eta Q}{bh^2KH^2} + \frac{I^2Rh}{3\kappa_\gamma lKH^2Q} + 1 \right)^{-1}.$$

Расчет индуктора магнитного поля рассмотрим на примере тороидального сердечника с зазором, который одновременно выполняет функцию щелевого дросселирующего канала. Необходимые параметры определяем из следующих формул [4]:  $H = NI/h$ , где  $N$  — количество витков в обмотке;  $L = \mu N^2 lb/h$ , где  $\mu$  — магнитная проницаемость МРС;  $I_m = B_m h/\mu N$ , где  $B_m$  — индукция насыщения магнитного материала;  $R = N\rho 8(b+l)/\pi d^2$ , где  $\rho$  — удельное сопротивление материала;  $d$  — диаметр провода обмотки.

Таким образом, требования (1)—(5) принимают следующий вид:

$$h \left[ \frac{U_\Pi}{\mu N^2 lb} - \frac{8B_m h \rho}{\pi \mu N^2 d^2} \left( \frac{1}{l} + \frac{1}{b} \right) \right] \geq \frac{dI}{dt_\tau}; \quad (10)$$

$$\frac{bh^2KB_m^2}{4\eta Q\mu^2} + 1 \geq D_\tau; \quad \frac{3lKB_m^2}{h\mu^2} \geq \Delta p_\tau; \quad (11), (12)$$

$$B_m h/\mu N \leq I_d; \quad (13)$$

$$\left[ \frac{4\eta\mu^2 Q}{bh^2KB_m^2} + \frac{8\rho h_3(b+l)}{3\pi N d^2 \kappa_\gamma l K Q} + 1 \right]^{-1} \geq \kappa_\tau. \quad (14)$$

Система неравенств (10)—(14) содержит все необходимые для определения конструктивные параметры МР-дресселя и позволяет в случае необходимости производить оптимизацию требуемых показателей.

Ниже приведены конструкции и характеристики магнитореологических преобразователей, которые далеко не исчерпывают другие конструктивные решения. Рассматриваются преобразователи двух разновидностей: без магнитопровода и с магнитопроводом. Две конструкции магнитореологических преобразователей без магнитопровода со спиральным проходным каналом и с пористой насадкой приведены в работе [2].

На рис. 1 представлена схема преобразователя без магнитопровода, который состоит из корпуса 6, катушки 5, соединительных штуцеров 1 [5]. В корпусе катушки установлен сердечник, выполненный

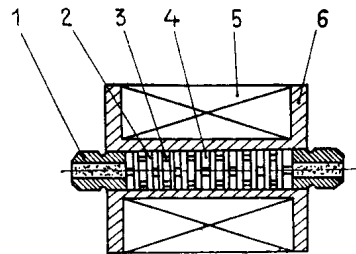


Рис. 1.

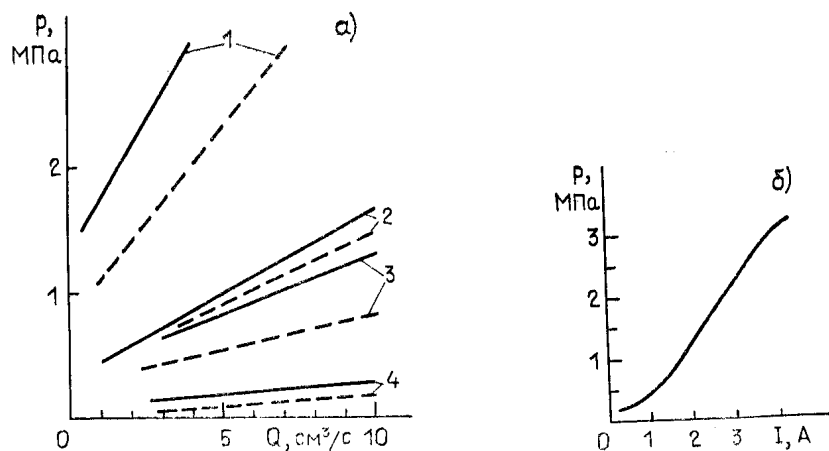


Рис. 2.

из набора шайб 3 и 4 из магнитного материала. Шайбы разделены немагнитными прокладками 2, причем шайбы 4 имеют отверстия в центре, а шайбы 3 — систему отверстий по периферии. Шайбы 3 и 4 расположены в такой последовательности, чтобы поток жидкости был ориентирован поперек магнитного поля, образованного соседними шайбами. В данной конструкции снижение мощности управления, т. е. тока в обмотке управления, достигается введением шайб из магнитного материала, что при прочих равных условиях повышает индукцию в рабочем зазоре преобразователя.

Для уменьшения начального гидравлического сопротивления шайбы 4 выполняются с отверстием в центре большего диаметра. Семейство статических характеристик наборного преобразователя  $p = f(Q)$  при  $I = \text{const}$  двух модификаций приведены на рис. 2а. Сплошными линиями показаны характеристики преобразователя с диаметром центрального отверстия шайбы 4, равным 2 мм, а штриховыми линиями — 3 мм, для токов: 1 — 4 А, 2 — 2 А, 3 — 1 А, 4 — 0. На рис. 2б показана зависимость давления от тока  $p = f(I)$  при постоянном расходе  $4 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Как видно из графиков, зависимость давления на преобразователе от расхода линейна, а от тока в общем случае нелинейна из-за квадратичной зависимости касательных напряжений от напряженности магнитного поля, что особенно заметно в области малых его значений [2]. При достаточно больших напряженностях характеристика близка к линейной.

Широкими функциональными возможностями обладает преобразователь с соединенной параллельно дополнительной гидромагистралью, снабженной нелинейным дросселем, например, квадратичным, потери давления в котором пропорциональны квадрату скорости течения (рис. 3) [6]. Преобразователь имеет корпус 4 из немагнитного мате-

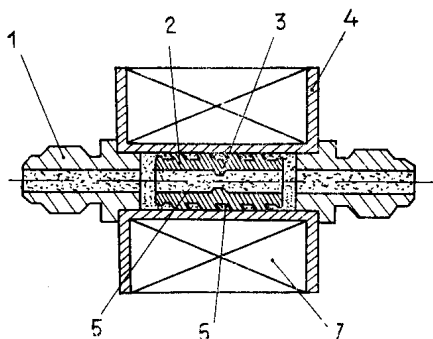


Рис. 3.

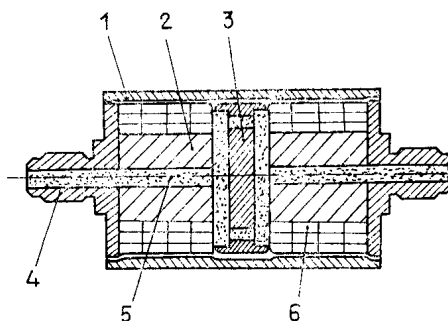


Рис. 4.

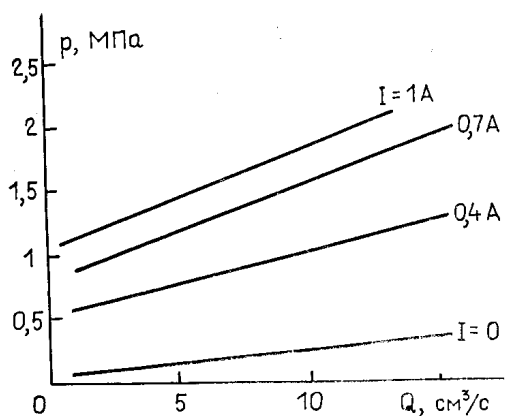


Рис. 5.

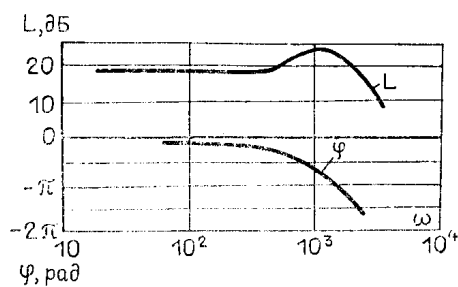


Рис. 6.

риала, на котором установлена катушка 7, являющаяся индуктором. В корпусе размещен цилиндрический стержень 2, имеющий винтовую нарезку, образующую с внутренней стенкой индуктора спиральный канал 6, являющийся основной магистралью. Рабочая жидкость подводится и отводится через штуцер 1. В стержне 2 выполнен сквозной осевой канал 5, являющийся дополнительной гидромагистралью. В канале 5 установлен дроссель 3, который представляет собой одну или несколько шайб с отверстием, имеющим острую кромку.

Вследствие отрыва потока и вихреобразования на таком местном сопротивлении потери давления на нем прямо пропорциональны квадрату скорости (расхода).

Без магнитного поля магнитореологическая суспензия беспрепятственно протекает через преобразователь. При включении соленоида в цепь питания резко возрастают потери на трение в основной магистрали и она «закрывается». При этом скорость жидкости в дополнительной гидромагистрали возрастает, что ведет к соответствующему увеличению давления на входе в преобразователь. Определенное соотношение сопротивлений основной и дополнительной гидромагистралей обеспечивает широкий динамический диапазон регулирования и малые потери в холостом режиме даже при больших расходах.

Для уменьшения потребляемой энергии и габаритов сконструирован МР-преобразователь с магнитопроводом (рис. 4), в котором индуктор магнитного поля и шайбы, образующие гидромагистраль, размещены в корпусе из магнитного материала 1 [7]. В корпус ввернуты шайбы 2 из магнитного материала с проходным каналом в центре, шайба 3 с проходным отверстием на периферии. На шайбах 2 с проходным каналом в центре размещен индуктор магнитного поля 6, обмотки которого соединены последовательно. Вход и выход МРС 5 осуществляются через штуцеры 4. При подаче сигнала на катушки намагничиваются шайбы 2 и 3 и образовавшееся между шайбами магнитное поле воздействует на МРС, протекающую по гидромагистрали.

Введение корпуса из магнитного материала, выполняющего роль магнитопровода и магнитного экрана, а также расположение индуктора магнитного поля непосредственно в зоне гидромагистрали позволяют получить заданную индукцию магнитного поля при значительно меньшем управляющем сигнале, а значит, уменьшить потребляемую мощность и габариты преобразователя. Статические характеристики преобразователя с магнитопроводом показаны на рис. 5.

Динамические режимы преобразователей характеризуются совокупностью многих переходных физических явлений, из которых наиболее важны электромагнитные и гидромеханические процессы. Как показали экспериментальные исследования, характерные времена кинетики структурообразования в МРС являются величинами несравнимо малыми по сравнению с соответствующими временами переходных процессов в

подводящих гидравлических линиях и индукторах магнитного поля. Это позволяет при анализе динамики проектируемой системы в первом приближении описывать собственно гидравлические каналы их статическими расходными характеристиками. На основе данного подхода была построена математическая модель стенда для снятия экспериментальных характеристик МР-дресселя. Описание гидродинамических процессов в насосной станции и подводящих гидравлических линиях базируется на теории нестационарного течения ньютоновской жидкости и методе разбиения гидравлического тракта на дискретные участки, описываемые с помощью аппарата обыкновенных дифференциальных уравнений. Результаты цифрового моделирования переходных процессов на мини-ЭВМ СМ-4 показали хорошее согласие с экспериментальными данными (погрешность расчетных значений резонансных частот и амплитудных значений составила менее 10 %).

Проведенные исследования показали основные пути улучшения динамических характеристик проектируемых систем. Наиболее эффективным средством является уменьшение объема соединительных линий и применение мостовых и полумостовых схем включения МР-дресселей, обеспечивающих квазистатические режимы в подводящих гидравлических линиях. Основные способы улучшения динамических характеристик собственно МР-дресселей связаны с повышением быстродействия индукторов магнитного поля и заключаются в применении высокоомных магнитных материалов, снижающих потери на вихревые токи, и использовании отрицательных обратных связей по току для компенсации индуктивности обмоток.

Применение вышеописанных конструкторских решений и использование ключевых усилителей тока позволило создать мостовые преобразователи, имеющие пологую амплитудно-частотную характеристику в диапазоне до 200—250 Гц и обладающие хорошими энергетическими показателями. Типовые экспериментальные логарифмические амплитудно- и фазо-частотные характеристики мостового преобразователя представлены на рис. 6.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов А. А., Нагорный В. С. Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1979. 288 с.
2. Шульман З. П., Кордонский В. И. Магнитореологический эффект. — Минск: Наука и техника, 1982. 184 с.
3. Шульман З. П., Кордонский В. И., Зальцгендлер и др. Структура, физические свойства и динамика магнитореологических суспензий. АН БССР ИТМО им. А. В. Лыкова. Препринт № 19. Минск, 1983. 42 с.
4. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М.: Наука, 1971. 942 с.
5. Шульман З. П., Кордонский В. И., Войцехович М. И., Куневич Т. В., Протасевич Н. Л. Магнитореологический дроссель. Авт. свид. № 929945. — Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки, 1980, № 8, с. 144.
6. Шульман З. П., Кордонский В. И., Войцехович М. И., Шекинова К. И. Магнитореологический дроссель. Авт. вид. № 777313. — Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки, 1980, № 9, с. 144.
7. Шульман З. П., Кордонский В. И., Хаджинов М. К., Столбанов Н. А., Протасевич Н. А., Шекинова К. И. Магнитореологический дроссель. Авт. свид. № 1024637. — Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки, 1983, № 23, с. 109.

Поступила 29 октября 1984 г.