

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ГИБРИДНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МАГНИТОЖИДКОСТНЫМИ УПРАВЛЯЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

К.В. Найгерт¹, В.А. Целищев²

¹*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,*

²*Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия*

Гидравлические системы, несмотря на наличие многих конструктивных и эксплуатационных преимуществ имеют некоторые недостатки, основными из которых являются, изменение геометрии проточной части, вследствие эрозионных эффектов и наличие электромеханических преобразователей. Это требует развитие технологий управления рабочей средой и поиска новых конструктивных решений. Достаточно простым и перспективным решением устранения данных негативных особенностей является создание гибридных гидравлических систем. Удачным направлением создания гибридных гидравлических систем можно обозначить интеграцию в их конструкцию магнитожидкостных регулирующих элементов. Магнитожидкостные регулирующие элементы отличаются высокой скоростью ответа на сигнал управления, так как не требуют трансформации электрического управляющего сигнала. Также магнитожидкостные элементы допускают выполнение простой геометрии проточной части, что значительно снижает стоимость производства и эксплуатации гидравлических систем, повышает их ресурс и надежность.

Поэтому гибридные гидравлические устройства с магнитожидкостными управляющими элементами вызывают огромный интерес и подлежат активному дальнейшему развитию. Эксплуатация и проектирование гибридных гидравлических систем осложняются отсутствием теоретической базы и типовых конструктивных решений, что делает невозможным их распространение в промышленных масштабах. Все это затрудняет модернизацию производственного оборудования и технологических процессов, что определяет актуальность выбранного направления исследовательской работы.

Текст приводит теоретические основы расчета магнитожидкостных управляющих элементов. В работе представлена оригинальная запатентованная конструкция гибридного гидравлического устройства – смесителя дозатора с магнитожидкостными управляющими элементами. Предложен метод численного моделирования рабочих параметров смесителя дозатора. Авторский метод позволяет производить гидравлический расчет смесителя дозатора с учетом характеристик управляющих электромагнитов.

Ключевые слова: магнитореологические системы, магнитожидкостные регулирующие элементы, гибридные гидравлические системы, технологии управления рабочей средой, смеситель-дозатор.

Введение

Объемы магнитных жидкостей уже давно применяются в качестве уплотнений и запорных элементов. В основном это связано с их адаптивностью, высокой точностью перекрытия сечения, долговечностью, надежностью и простотой реализации управления рабочими характеристиками в реальном времени. Поэтому данная технология считается перспективной для совершенствования и развития. Применение магнитожидкостных регулирующих элементов повышает энергоэффективность гидравлических систем, так как они не требуют энергетических затрат на перекрытие потока и при отключении управляющего электромагнитного поля магнитожидкостный регулирующий элемент возвращается к исходной геометрии, закрывая регулируемую им гидрولينию.

Актуальность

Гибридные гидравлические системы позволяют сократить расход электроэнергии по сравнению с классическими гидравлическими аналогами. При этом системы с магнитожидкостными регулируемыми элементами обладают высокой точностью и скоростью отработки управляющего сигнала. Поэтому развитие магнитожидкостных технологий является актуальным.

Фундаментальные основы расчета магнитожидкостных управляющих элементов

Сферический объем магнитной жидкости, помещенный во внешние магнитные поля, трансформируется и приобретает эллиптическую форму (рис. 1), при этом происходит вытягивание объема в направлении действия напряженности магнитного поля и сжатие в направлении, перпендикулярном направлению действия магнитного поля [1].

Параметры получающегося эллипсоида:

длинная полуось:

$$b = R + db;$$

короткая полуось:

$$a = R - da.$$

Так как объем магнитной среды постоянен справедливо следующее:

$$(4\pi/3)R^3 = (4\pi/3)(R + db)(R - da)^2 = V,$$

R – радиус сферического объема, V – объем магнитоологической жидкости:

$$V = 4\pi ab^2/3.$$

Где напряженность размагничивающего магнитного поля, внутри сферического объема магнитной жидкости (противоположного по направлению внешнему магнитному полю):

$$H = H_0 - (N/\mu_0)M(H),$$

M – намагниченность, H_0 – внешнее магнитное поле, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, N – размагничивающий фактор:

$$N = \frac{1}{n^2-1} \left[\frac{n}{\sqrt{n^2-1}} \ln(n + \sqrt{n^2-1}) - 1 \right],$$

$$n = b/a.$$

Суммарная магнитная энергия магнитной жидкости выражается, как:

$$u_{mag} = -V \int_0^H M(H') dH'.$$

Магнитная сила, возникшая в результате деформации объема:

$$F = -\frac{du_{mag}}{db} = V \frac{d}{db} \int_0^H M(H') dH'.$$

Уравнение Бернулли для магнитной жидкости:

$$(1/2)\rho v^2 + \rho gz + p \int_0^H M(H') dH' = const,$$

p – давление в магнитной жидкости, ρ – плотность, g – ускорение свободного падения, v – скорость, z – высота по нормали.

Прикладной расчет магнитожидкостных управляющих элементов

Описание рабочего процесса магнитожидкостного управляющего элемента требует рассмотрения воздействия на стенки упругого элемента, заполненного магнитной жидкостью, магнитной и немагнитной сред.

Сделаем допущение о том, что наличием тонкой стенки упругого элемента можно пренебречь.

Поэтому равновесное давление на границе раздела (на стенке упругого элемента, заполненного магнитной жидкостью) со сторон магнитной и немагнитной сред выражается как [1–3]:

$$p_b = p_a + \int_0^{H_a} M_a(H) dH + \frac{1}{2\mu_0} M_{an}^2,$$

p_b – давление со стороны немагнитной жидкости, p_a – давление со стороны магнитной жидкости, M_{an} – нормальная компонента намагниченности:

$$M_{an} = M_a \cdot n.$$

Физические величины с индексом a относятся к магнитной среде.

Для осей симметрии эллиптического объема магнитной жидкости равновесные давления на стенку примут следующие значения.

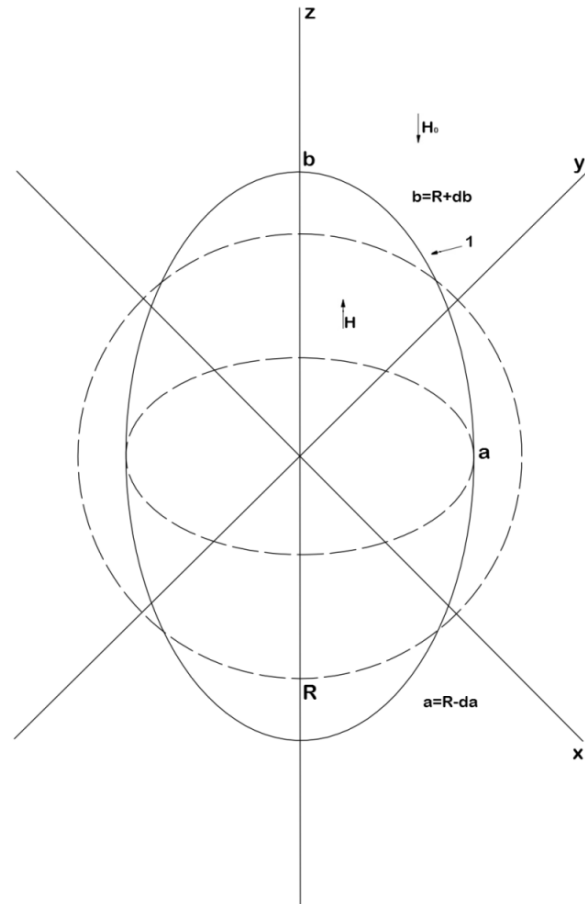


Рис. 1. Трансформация сферического объема магнитной жидкости в эллипсоид вращения:
1 – объем магнитной жидкости

Расчет и конструирование

Ось симметрии, длинная полуось при $M_{an} = M_a$:

$$p_b(OB) = p_a(OB) + \int_0^{H_a} M_a(H) dH + \frac{1}{2\mu_0} M_a^2.$$

Ось симметрии, короткая полуось при $M_{an} = 0$:

$$p_b(OA) = p_a(OA) + \int_0^{H_a} M_a(H) dH.$$

Сферическая форма небольшого объема магнитной жидкости физически более предпочтительна и связана с капиллярными эффектами. В случае попадания объема магнитной жидкости в направленное внешнее магнитное поле создается разность давлений на осях симметрии сферического объема, в результате чего происходит трансформация формы объема, приобретение эллиптической формы, компенсация неоднородности давления внутри объема магнитной жидкости вследствие нарастания кривизны поверхности и роста капиллярного скачка давления.

Форму объема магнитной жидкости во внешнем магнитном поле можно выразить из условия минимума суммы магнитной энергии:

$$E = u_{mag} + E_S,$$

E_S – поверхностная энергия:

$$E_S = 2\pi\gamma ab[1/k + (1/e)\text{arcsine}],$$

γ – коэффициент поверхностного натяжения, e – эксцентриситет эллипсоида:

$$e = \sqrt{(a^2 - b^2)/a}.$$

Плотность потока энергии (вектор Пойнтинга) [4–8]:

$$\Pi = \frac{c}{4\pi} [EH],$$

E – напряженность электрического поля [9–10]:

$$E = \frac{Fq}{q},$$

F_q – сила, действующая на заряд, q – заряд, c – скорость распространения электромагнитных взаимодействий в вакууме:

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с.}$$

Справедливо следующее:

$$\frac{c}{4\pi} [EH] = \frac{E}{St},$$

t – время, S – площадь сечения переноса энергии.

Электромагнитная сила [11–12]:

$$F_{el} = Bil,$$

i – сила тока, l – длина проводника, B – магнитная индукция поля:

$$B = \mu_0(H + M).$$

Электромагнитная сила с учетом характеристик индуктора:

$$F_{el} = (N_n \cdot i)^2 \cdot \mu_0 \cdot S_m / (2 \cdot l_m^2),$$

l_m – длина зазора между индуктором объемом магнитной жидкости, S_m – площадь сечения электромагнита, N_n – количество витков.

Оптимальные режимы работы магнитоожидкостных элементов можно достичь при их эксплуатации на малых значениях сечений радиальных зазоров, поэтому расход жидкости на магнитоожидкостном элементе [13–20]:

$$Q = \frac{\Delta p l d_0 \delta_0^3}{2\mu l \cdot 10^5},$$

δ_0 – радиальный зазор, Δp – перепад давления в зазоре, d_0 – средний диаметр магнитоожидкостного элемента, μ – вязкость среды, l – длина магнитоожидкостного элемента.

Применения магнитоожидкостных управляющих элементов

и оригинальное конструктивное решение гибридного гидравлического аппарата

Использование нестационарных электромагнитных полей, рационально в гибридных гидравлических аппаратах. На рис. 2 представлен гибридный гидравлический аппарат, имеющий в своей конструкции магнитоожидкостные регулирующие элементы [21].

В предложенной конструкции регулирование расходных характеристик магнитоожидкостных элементов реализуется посредством изменения вольт-амперных характеристик, частоты и длительности электрических сигналов, подаваемых на электромагниты и синхронизации / рассинхронизации управляющих сигналов открытия / закрытия магнитоожидкостных регулирующих элементов относительно друг друга.

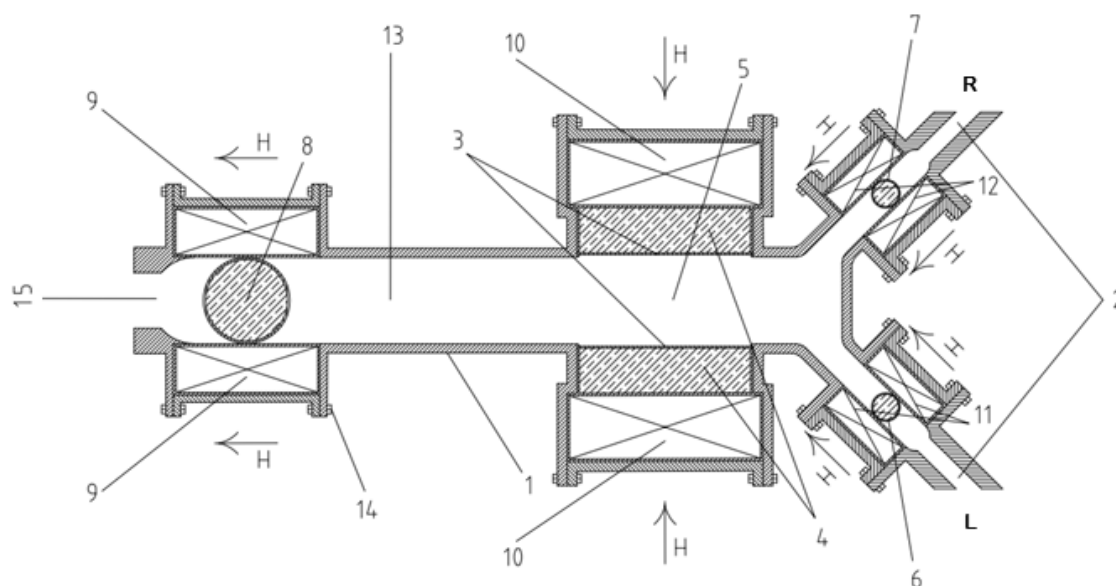


Рис. 2. Смеситель – дозатор с магнитожидкостными управляющими элементами: 1 – корпус, 2 – подводящий канал, заполненный компонентом смеси, 3 – мембрана, 4 – кольцевая полость, заполненная магнитной жидкостью, 5 – рабочая камера, 6, 7, 8 – магнитожидкостный клапан, упругая сферическая капсула, заполненная магнитной жидкостью, 9, 10, 11, 12 – кольцевой электромагнит, 13 – напорный канал, заполненный смесью, 14 – крепежный элемент, 15 – канал подачи готовой смеси, H – направленное электромагнитное поле

Смеситель – дозатор с магнитожидкостными управляющими элементами – работает по принципу создания перепадов давления в рабочей камере посредством изменения электромагнитной составляющей давления в магнитной жидкости, находящейся в полости, отделенной от рабочей камеры упругой мембраной. При импульсной подачи напряжения на кольцевой электромагнит, управляющий полостью, заполненной магнитной жидкостью, в магнитной жидкости происходит высокочастотная пульсация электромагнитного давления, являющегося составной частью полного давления, оказываемого на мембрану со стороны магнитной жидкости. Это приводит к передаче пульсации давления через мембрану в рабочую камеру смесителя – дозатора. Значение перепада давления в рабочей камере регулируется посредством управления нагрузкой, подаваемой на кольцевой электромагнит, управляющий полостью, заполненной магнитной жидкостью. Расход смеси и компонентов регулируется при помощи магнитожидкостных элементов, помещенных в электромагнитные управляющие поля. Степень открытия магнитожидкостных клапанов управляется за счет изменения мощности кольцевых электромагнитов в зонах, действия которых размещены соответствующие магнитожидкостные элементы. Сферические объемы магнитной жидкости имеют свойство в направленном магнитном поле принимать эллипсоидальную форму. Поэтому упругие капсулы, заполненные магнитной жидкостью, находящиеся во внешнем магнитном поле, вытягиваются в направлении действия приложенного внешнего магнитного поля и сжимаются в направлении, перпендикулярном магнитному полю. Приобретая эллипсоидальную форму, магнитожидкостные элементы изменяют пропускную способность каналов, в которых они размещены. Поэтому направление действия магнитного поля электромагнита, управляющего полостью, заполненной магнитной жидкостью перпендикулярно направлению тока смеси в рабочей камере, а направление действия магнитного поля электромагнитов, управляющих магнитожидкостными элементами параллельно направлению тока компонентов и смеси в каналах. Высокочастотная пульсация давления в рабочей камере приводит к перемешиванию компонентов.

Целесообразно выполнение мест под посадку магнитожидкостных элементов в виде каналов с расширениями, образующими полости. Подобная геометрия проточной части обеспечивает самогерметизацию магнитожидкостных регулирующих элементов и расширяет интервал рабочих давлений.

Расчет и конструирование

Расчет рабочей камеры с магнитожидкостным управлением

Уравнения Бернулли для неподвижной магнитной жидкости в рабочей камере примет вид [1]:

$$p = \text{const} - \rho g z + \int_0^H M(H') dH'.$$

Давление в рабочей камере:

$$p_t = p_f + p,$$

p_f – начальное давление смеси в рабочей камере.

Синхронизация / рассинхронизация включения управляющих электромагнитов

Для эффективной работы устройства необходимо установить последовательность и длительность включения управляющих магнитов, так как поднятие давления в рабочей камере посредством кольцевой полости, заполненной магнитной жидкостью, возможно только в момент одновременного отключения электромагнитов 9, 11, 12 и включения электромагнита 10. Начальное избыточное давление в рабочей камере формируется в случае одновременного отключения электромагнита 9 и включения электромагнитов 11, 12 или одного из электромагнитов 11, 12. Подача готовой смеси компонентов осуществляется при одновременном включении электромагнита 9 и отключении электромагнитов 11, 12, что также может сопровождаться включением электромагнита 10. Интервалы включения электромагнитов рассчитываются исходя из объемов компонентов, объема готовой смеси, давления в каналах, подводящих компоненты, а также определяется вязкостью компонентов, дисперсностью компонентов и желаемой однородностью смеси. Начальное избыточное давление в рабочей камере корректируется регулированием давления в подводящих каналах.

Расчет течения в каналах

Давление в подводящих каналах задается и регулируется. Давление в сечении канала подачи готовой смеси при закрытом магнитожидкостном элементе 8 примем равным атмосферному давлению.

Расход на магнитожидкостном элементе 6:

$$Q_6 = \frac{\Delta p_6 \pi d_6 \delta_6^3}{2\mu l_6 \cdot 10^5}; \Delta p_6 = p_{2L} - p_5.$$

Расход на магнитожидкостном элементе 7:

$$Q_7 = \frac{\Delta p_7 \pi d_7 \delta_7^3}{2\mu l_7 \cdot 10^5}; \Delta p_7 = p_{2R} - p_5,$$

p_{2L} – давление в подводящем канале L, p_{2R} – давление в подводящем канале R, p_5 – давление в рабочей камере при выключенном электромагните 10.

Расход на магнитожидкостном элементе 8:

$$Q_8 = \frac{\Delta p_8 \pi d_8 \delta_8^3}{2\mu l_8 \cdot 10^5}; \Delta p_8 = p_{13} - p_{15}$$

или

$$\Delta p_8 = p_{t5} - p_{15}; p_5 \approx p_{13},$$

$\delta_6; \delta_7; \delta_8$ – радиальные зазоры, образованные магнитожидкостными элементами 6, 7, 8, $\Delta p_6; \Delta p_7; \Delta p_8$ – перепады давления в зазорах, образованных магнитожидкостными элементами 6, 7, 8, $d_6; d_7; d_8$ – средний диаметр магнитожидкостных элементов 6, 7, 8, μ – вязкость среды, $l_6; l_7; l_8$ – длины магнитожидкостных элементов 6, 7, 8, p_{13} – давление в напорном канале, p_{15} – давление в канале подачи готовой смеси, p_{t5} – давление в рабочей камере при включенном электромагните 10:

$$p_{t5} = p_{f5} + p_4,$$

p_4 – давление в кольцевой полости, заполненной магнитной жидкостью:

$$p_4 = \text{const} - \rho g z + \int_0^H M(H') dH',$$

p_{f5} – начальное давление смеси в рабочей камере 5:

$$p_{f5} = p_{2L} - \left(h_{f5} - h_{2L} + \frac{v_{f5}^2 - v_{2L}^2}{2g} \right) \gamma + \Delta p_l,$$

$$p_{f5} = p_{2R} - \left(h_{f5} - h_{2R} + \frac{v_{f5}^2 - v_{2R}^2}{2g} \right) \gamma + \Delta p_l,$$

γ – удельный вес, $h_{f5} - h_{2R}; h_{f5} - h_{2L}$ – разности высот центров тяжести контрольных сечений от произвольно выбранного горизонтального уровня, $v_{f5}; v_{2R}; v_{2L}$ – средние скорости, Δp_l – гидравлические потери:

$$\Delta p_l = \frac{v^2}{2g} \gamma \xi,$$

ξ – коэффициент сопротивления.

Результаты численного моделирования

На основе описанной математической модели произведен численный эксперимент, в результате которого получены результаты, представленные на рис. 3–4.

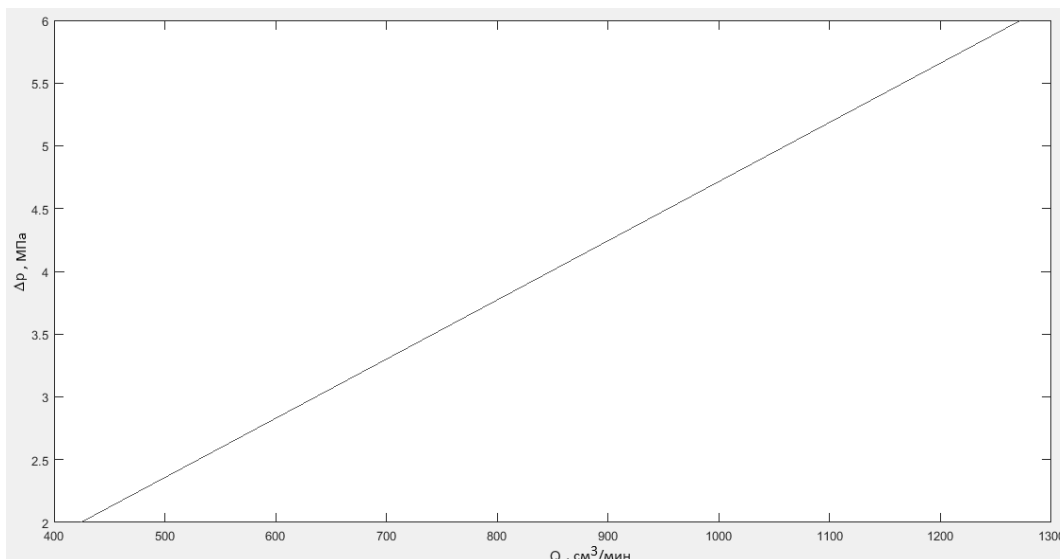


Рис. 3. Зависимость расхода на магнитожидкостном управляющем элементе от градиента давления для радиального зазора 18000 мкм

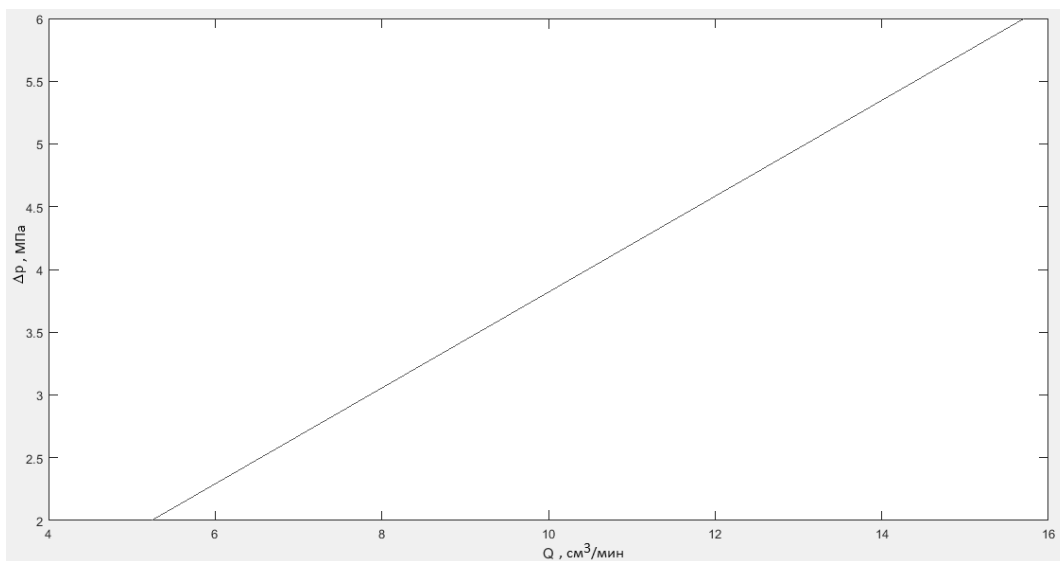


Рис. 4. Зависимость расхода на магнитожидкостном управляющем элементе от градиента давления для радиального зазора 2000 мкм

Полученные графические зависимости расхода от градиента давления соответствуют ожидаемому характеру зависимости для ламинарного режима течения и простой геометрии сечения проточной части. Результаты моделирования подтверждают применимость предложенного метода расчета магнитожидкостных элементов в инженерной практике для большого интервала рабочих сечений радиального зазора.

Новизна научно-исследовательской работы

Разработанная конструкция смесителя дозатора отличается от ранее известных тем, что рабочий процесс устройства организован путем реализации магнитожидкостных эффектов, позволяющих посредством изменения электромагнитной составляющей давления в кольцевой полости,

Расчет и конструирование

заполненной магнитной жидкостью, производить смешение компонентов и за счет трансформации формы объема магнитожидкостных управляющих элементов в направленных полях осуществлять дозирование компонентов и готовой смеси.

Предложенный метод расчета рабочих параметров смесителя дозатора с магнитожидкостными управляющими элементами применим для оптимизации рабочих характеристик оригинальной конструкции смесителя дозатора в процессе проектирования и расчета управляющего сигнала на электромагнитах при эксплуатации устройства.

Выводы

Гибридные гидравлические устройства с магнитожидкостными управляющими элементами являются достойной альтернативой классическим гидравлическим устройствам.

Методика численного моделирования рабочих процессов гибридных гидравлических устройств, содержащих магнитожидкостные управляющие элементы и рабочую камеру с магнитожидкостным управлением, отвечает критериям достаточной точности.

Гибридные гидравлические устройства обладают высокой эффективностью, надежностью и потенциалом к дальнейшему развитию.

Магнитожидкостные управляющие элементы повышают точность управления и скорость отклика на сигнал управления.

Литература

1. Такетоми, С. *Магнитные жидкости* / С. Такетоми, С. Такадзуми. – М.: Мир, 1993. – 272 с.
2. Бибик, Е.Е. *Реология дисперсных систем* / Е.Е. Бибик. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 172 с.
3. Гусев, В.В. *Физические основы проектирования оборудования: учеб. пособие* / В.В. Гусев, В.К. Самойликов. – М.: МИЭТ, 1999. – 141 с.
4. Смык, А.Ф. *Физика. Электромагнетизм: курс лекций* / А.Ф. Смык. – М.: МГУП, 2007. – 160 с.
5. Денисов, А.А. *Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики* / А.А. Денисов, В.С. Нагорный. – Л.: Машиностроение, 1979. – 257 с.
6. *New Composite Elastomers with Giant Magnetic Response* / A.V. Chertovich, G.V. Stepanov, E.Y. Kramarenko, A.R. Khokhlov // *Macromolecular Materials and Engineering*. – 2010. – Vol. 295, no. 4. – P. 336–341. DOI: 10.1002/mame.200900301
7. *Brigadnov, I.A. Mathematical Modeling of Magneto-Sensitive Elastomers* / I.A. Brigadnov, A. Dorfmann // *Int. J. Solid. Struct.* – 2003. – Vol. 40. – P. 4659–4674. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00265-8
8. *Jackson, J.D. Classical Electrodynamics* / J.D. Jackson. – 2nd Ed. – New York: John Wiley & Sons, Inc, 1975. – 848 p.
9. Кузнецов, А.В. *Элементарная электротехника* / А.В. Кузнецов. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 896 с.
10. Широков, К.М. *Алгоритм определения магнитных характеристик электротехнических изделий* / К.М. Широков // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2013. – № 1. – С. 70–73.
11. Немцов, М.В. *Справочник по расчету параметров катушек индуктивности* / М.В. Немцов, Ю.М. Шамаев. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 136 с.
12. Калантаров, П.Л. *Расчет индуктивностей: Справочная книга* / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – 3-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
13. *Magnetic and Viscoelastic Response of Elastomers with Hard Magnetic Filler* / E.Y. Kramarenko, A. V. Chertovich, G. V. Stepanov et al. // *Smart Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 24. – P. 035002. DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/035002
14. *Stepanov, G.V. Magnetorheological and Deformation Properties of Magnetically Controlled Elastomer with Hard Magnetic Filler* / G.V. Stepanov, A.V. Chertovich, E.Y. Kramarenko // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2012. – Vol. 324. – P. 3448–3451. DOI:10.1016/j.jmmm.2012.02.062
15. *Dorfmann, A. Nonlinear Magnetoelastic Deformations* / A. Dorfmann, R.W. Ogden // *Q. J. Mech. Appl. Math.* – 2004. – Vol. 57 (4). – P. 599–622. DOI: 10.1093/qjmath/57.4.599

16. Bustamante, R. *On Variational Formulations in Nonlinear Magnetoelastostatics* / R. Bustamante, A. Dorfmann, R.W. Ogden // *Math. Mech. Solids*. – 2008. – Vol. 13. – P. 725. DOI: 10.1177/1081286507079832v1

17. Filipcsei, G. *Magnetodeformation Effects and the Swelling of Ferrogels in a Uniform Magnetic Field* / G. Filipcsei, M. Zrinyi // *J. Phys. Condens. Matter* 22. – P. 276001. DOI: 10.1088/0953-8984/22/27/276001

18. Bustamante, R. *A Nonlinear Magnetoelastic Tube under Extension and Inflation in an Axial Magnetic Field: Numerical Solution* / R. Bustamante, A. Dorfmann, R.W. Ogden // *J. Eng. Math.* – 2007. – Vol. 59. – P. 139–153. DOI: 10.1007/s10665-006-9088-4

19. *Material Transport of a Magnetizable Fluid by Surface Perturbation* / V. Bohm, V.A. Naletova, J. Popp et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2015. – Vol. 395. – P. 67–72. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.07.036

20. Carlson, J.D. *MR Fluid, Foam and Elastomer Devices* / J.D. Carlson, M.R. Jolly // *Mechanics*. – 2000. – Vol. 10. – P. 555–569. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00064-1

21. Пат. РФ № 2639906. *Смеситель-дозатор с магнитожидкостными управляющими элементами* / К.В. Найгерт, В.Т. Тутынин. – Опубл. 25.12.2017, Бюл. № 36.

Найгерт Катарина Валерьевна, кандидат технических наук, докторант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, kathy_naigert@mail.ru.

Целищев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладной гидромеханики», Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, pgl.ugatu@mail.ru.

Поступила в редакцию 4 сентября 2018 г.

DOI: 10.14529/engin180404

CALCULATING PERFORMANCE PARAMETERS OF HYBRID HYDRAULIC SYSTEMS WITH FERROFLUID CONTROL ELEMENTS

K.V. Naigert¹, kathy_naigert@mail.ru,

V.A. Tselischev², pgl.ugatu@mail.ru

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

²Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

Although hydraulic systems have many structural and operational advantages, there are also some disadvantages. The main disadvantages are the use of electromechanical transducers and changes in the geometry of flow part due to erosion effects. This requires developing fluid control technologies and new constructive solutions. A simple and promising way of eliminating these negative features is to develop hybrid hydraulic systems. A successful approach to developing hybrid hydraulic systems is integrating ferrofluid control elements in their constructions. Ferrofluid control elements are characterized by a high speed of response to a control signal since they do not require transformation of electrical control signals. Ferrofluid control elements also allow for simple geometry of flow parts, which significantly reduces the production and operation costs of hydraulic systems, and increases their operational life and reliability.

Therefore, hybrid hydraulic systems with ferrofluid control elements are in the focus of attention and active research. Hybrid hydraulic systems are difficult to use and to design due to

a lack of theoretical basis and typical constructive solutions, which makes impossible their industrial distribution. This hampers modernization of production equipment and technological processes. Thus, the research issue is relevant.

The paper provides a theoretical basis for calculating ferrofluid control elements. It presents an original patented construction of a hybrid hydraulic device, i.e. the mixer of a dosing dispenser with ferrofluid control elements. We proposed a method for simulating the performance parameters of the mixer of a dosing dispenser. The authors' method makes it possible to calculate the hydraulic parameters of the mixer of a dosing dispenser taking into account the characteristics of control electromagnets.

Keywords: magnetorheological systems, ferrofluid control elements, hybrid hydraulic systems, fluid control technologies, mixer-dispenser.

References

1. Taketomi S., Tikadzumi S. *Magnitnyye zhidkosti* [The Magnetic Fluids]. Moscow, Mir, 1993. – 272 p.
2. Bibik E.E. *Reologiya dispersnykh system* [Rheology of Disperse Systems]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1981. – 172 p.
3. Gusev V.V., Samoilkov V.K. *Fizicheskiye osnovy proyektirovaniya oborudovaniya* [Physical Basis of Equipment Design]. Moscow, 1999. 141 p.
4. Smyk A.F. *Fizika. Elektromagnetizm. Kurs lektsiy* [Physics. Electromagnetism. Lectures.]. Moscow, 2007. 160 p.
5. Denisov A.A., Nagornyy V.S. *Elektro Gidro- i elektrogazodinamicheskiye ustroystva avtomatiki* [Electro Hydro- and Electro Gas Dynamic Automation]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979. 257 p.
6. Chertovich A.V., Stepanov G.V., Kramarenko E.Y., Khokhlov A.R. New Composite Elastomers with Giant Magnetic Response. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2010, vol. 295, no. 4, pp. 336–341. DOI: 10.1002/mame.200900301
7. Brigadnov I.A., Dorfmann A. Mathematical Modeling of Magneto-Sensitive Elastomers. *Int. J. Solid. Struct.*, 2003, vol. 40, pp. 4659–4674. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00265-8
8. Jackson J.D. *Classical Electrodynamics*. 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc, 1975. – 848 p.
9. Kuznetsov A.V. *Elementarnaya elektrotehnika* [Elementary Electrical Engineering]. Moscow, DMK Press Publ., 2014. 896 p.
10. Shirokov K.M. [Algorithm for Determining the Magnetic Characteristics of Electro Technical Products]. *Izvestiya vuzov. Sev.-Kavk. region. tekhn. Nauki* [Proceedings of High Schools. North-Caucasus. Region. Tech. Science], 2013, no. 1, pp. 70–73. (in Russ.)
11. Nemtsov M.V., Shamaev Yu.M. *Spravochnik po raschetu parametrov katushek induktivnosti* [Guide to the Calculation of Inductor Parameters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981. 136 p.
12. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. *Raschet induktivnostei: Spravochnaya kniga* [Calculation of Inductances: Reference Book]. 3rd ed. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p.
13. Kramarenko E.Y., Chertovich A.V., Stepanov G.V. et al. Magnetic and Viscoelastic Response of Elastomers with Hard Magnetic Filler. *Smart Materials and Structures*, 2015, vol. 24, pp. 035002. DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/035002
14. Stepanov G.V., Chertovich A.V., Kramarenko E.Y. Magnetorheological and Deformation Properties of Magnetically Controlled Elastomer with Hard Magnetic Filler. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, vol. 324, P. 3448–3451. DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.02.062
15. Dorfmann A., Ogden R.W. Nonlinear Magnetoelastic Deformations. *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 2004, vol. 57(4), pp. 599–622. DOI: 10.1093/qjmam/57.4.599
16. Bustamante R., Dorfmann A., Ogden R.W. On Variational Formulations in Nonlinear Magnetoelastostatics. *Math. Mech. Solids*, 2008, vol. 13, p. 725. DOI: 10.1177/1081286507079832v1
17. Filipcsei G., Zrínyi M. Magnetodeformation Effects and the Swelling of Ferrogels in a Uniform Magnetic Field. *J. Phys. Condens.*, 2010, Matter 22, p. 276001. DOI: 10.1088/0953-8984/22/27/276001
18. Bustamante R., Dorfmann A., Ogden R.W. A Nonlinear Magnetoelastic Tube under Extension and Inflation in an Axial Magnetic Field: Numerical Solution. *J. Eng. Math.*, 2007, vol. 59, pp. 139–153. DOI: 10.1007/s10665-006-9088-4

19. Bohm V., Naletova V.A., Popp J. et al. Material Transport of a Magnetizable Fluid by Surface Perturbation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 395, pp. 67–72. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.07.036

20. Carlson J.D., Jolly M.R. MR Fluid, Foam and Elastomer Devices. *Mechatronics*, 2000, vol. 10, pp. 555–569. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00064-1

21. Naigert K.V., Tutynin V.T. *Smesitel'-dozator s magnitohidkostnymi upravlyayushchimi elementami* [The Mixing and Dosing System with the Ferrofluid Control Elements]. Patent RU, no. 2639906, 2017.

Received 4 September 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Найгерт, К.В. Особенности расчета рабочих параметров гибридных гидравлических систем с магнитожидкостными управляющими элементами / К.В. Найгерт, В.А. Целищев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 38–47. DOI: 10.14529/engin180404

FOR CITATION

Naigert K.V., Tselishev V.A. Calculating Performance Parameters of Hybrid Hydraulic Systems with Ferrofluid Control Elements. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 38–47. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180404
