

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ДРОССЕЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

К.В. Найгерт, С.Н. Редников

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Анализируются элементы магнитореологических приводных систем. Рассматривается способ регулирования расхода в управляющей магнитореологической линии при помощи магнитореологического дросселирующего устройства и приводится метод автоматизации рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства. Описывается способ реализации передачи управляющего сигнала и организации обратной связи по давлению. Приводится способ расчета управляющего сигнала контроллером и пример управляющего алгоритма.

В тексте приводятся принципиальные электрические схемы управления рабочим процессом магнитореологического дросселирующего устройства, позволяющие применять подобные магнитореологические дросселирующие устройства в приводах автоматических и мехатронных систем. Также приведен способ осуществления регулирования рабочих процессов магнитореологического дросселирующего устройства при помощи включения в систему дифференциального манометра. Описывается функциональная схема реализации работы тензодатчика разности давления.

Авторы предлагают принципиальную гидравлическую компоновочную схему для включения магнитореологического дросселирующего устройства в управляющий магнитореологический контур, предусматривающую термостатирование рабочей среды и позволяющую производить температурное дорегулирование реологических свойств рабочей жидкости. Приведен способ реализации проточного термостатирования рабочей среды магнитореологической системы.

Рассматриваются особенности управления системами термостатирования, созданными на базе термоэлектрических полупроводниковых элементов.

Описываются преимущества применения предложенной системы. Приводятся статические характеристики дросселирующего устройства, работающего в автоматическом режиме поддержания требуемых расходных характеристик. Производится анализ результатов натурного эксперимента и проводится их сопоставление с результатами численного моделирования рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства.

Эффективность предложенной системы автоматизации рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства подтверждается полученными результатами численного моделирования и натурного эксперимента.

Ключевые слова: автоматизированные системы, магнитореологические приводы, магнитореологические дросселирующие устройства, магнитореологический дроссель, автоматизация рабочих процессов, дифференциальный манометр, термостатирование рабочей среды, тензометрический мост, магнитореологический управляющий контур.

Введение. Гидравлические приводы хорошо себя зарекомендовали для автоматизации рабочих процессов различных систем и используются уже на протяжении многих десятилетий. В последнее время в конструкциях различных систем и агрегатов стали широко применяться магнитореологические управляющие контуры, содержащие магнитореологические дросселирующие устройства [1–3].

Магнитореологические приводные системы являются аналогом гидравлических приводных систем, поэтому сохраняют за собой все преимущества гидравлических систем, при этом обладая рядом отличительных положительных особенностей. Например, использование магнитореологических приводных систем позволяет избежать применения прецизионных пар трения, что повышает надежность системы, а также позволяет повысить скорость отклика системы на управляющий сигнал за счет реализации регулирования характеристик потока рабочей среды посредством управляющего магнитного поля [4–11].

Наиболее часто магнитореологические дроссели используются в конструкциях адаптивных опор, обеспечивающих регулируемую жесткость амортизации и подстраиваемую частоту вибро-

Расчет и конструирование

гашения. Также магнитореологические дроссели применяют в системах прецизионного позиционирования. Подобные системы требуют автоматизации рабочих процессов запорно-регулирующих аппаратов.

Автоматизация рабочего процесса систем предусматривает не только применение управляющего алгоритма, но и организацию обратной связи, позволяющей производить динамический контроль рабочих параметров системы по показаниям установленных датчиков.

Как известно, обратная связь реализуется при помощи подачи входного сигнала, пропорционального выходному сигналу (функции выходного сигнала), что позволяет влиять на динамику рабочего процесса системы.

Обратную связь разделяют на отрицательную и положительную. Положительная обратная связь потенцирует изменение выходного сигнала, что приводит к неустойчивости рабочих параметров и генерации за счет изменения входного сигнала незатухающих колебаний, а отрицательная обратная связь, изменяя входной сигнал, препятствует изменению выходного сигнала, делая систему более устойчивой к случайным изменениям параметров.

1. Постановка задачи. Применение магнитореологических приводов в мехатронных системах требует автоматизации их рабочих процессов. Вообще автоматизация рабочего процесса приводной системы возможна как при помощи аналоговых, так и цифровых технологий. Аналоговые технологии отличаются высокой скоростью реакции системы на изменения рабочих параметров и в случае возможности реализации простоты их программирования являются предпочтительней цифровых технологий, но цифровые технологии более универсальны и легко программируемы. Поэтому цифровые технологии значительно чаще применяются при автоматизации рабочих процессов.

Учитывая особенности управления расходными характеристиками магнитореологических дросселирующих устройств, а именно управление потоком посредством электрического сигнала, не требующего трансформации в иные виды энергии, целесообразно применение обратной электрической связи, что упрощает используемый управляющий алгоритм, следовательно, повышает скорость отклика приводной системы.

2. Решение поставленной задачи. В качестве реализуемого алгоритма управления применим рис. 1.

Для осуществления регулирования расхода в управляющих линиях применяются магнитореологические дросселирующие устройства, следовательно, прежде всего необходимо осуществить автоматизацию их рабочего процесса.

Контроль рабочего процесса магнитореологических дросселирующих устройств можно реализовать при помощи средств электроавтоматики и обратной связи по давлению (рис. 2).

В роли задающего устройства выступает микроконтроллер с заложенным в него алгоритмом, позволяющим изменять вольт-амперные характеристики блока электромагнитного управления потоком. Для магнитореологических дросселирующих устройств, конструкция блоков электромагнитного управления которых имеет дифференциальную обмотку электромагнитов, контроллер при необходимости позволяет производить амплитудную, фазовую и частотную модуляцию управляющего электрического сигнала, а также задавать скорость включения элементов дифференциальной обмотки электромагнита (рис. 3).



Рис. 1. Управляющий алгоритм

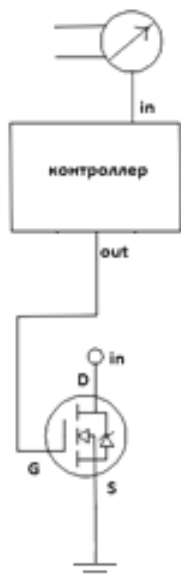


Рис. 2. Схема подключения силовой линии, питающей блок электромагнитного управления (однофазной обмотки электромагнита) магнитоореологического дросселирующего устройства

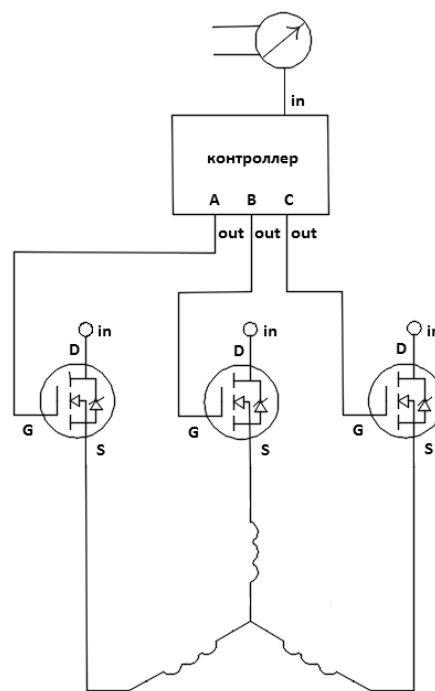


Рис. 3. Схема подключения силовой линии, питающей блок электромагнитного управления (трехфазной обмотки электромагнита) магнитоореологического дросселирующего устройства

Управляющий сигнал магнитоореологического дросселирующего устройства можно записать как

$$U_y = U_{вх} - U_o,$$

где $U_{вх}$ – входной сигнал; U_o – ошибка передачи.

Обратную связь по давлению целесообразно произвести за счет включения в гидравлический контур дифференциального манометра (рис. 4).

Действие дифференциального манометра основывается на тензорезистивном эффекте, заключающемся в измерении разности давлений, по изменению удельного сопротивления вещества проводника при деформации упругого элемента сенсора – мембраны с интегрированным полупроводниковым тензопреобразователем. В результате деформации мембраны под действием давления возникают локальные деформации тензорезисторного моста, что приводит к его разбалансировки. Изменения удельного сопротивления элементов тензорезисторного моста измеряются электронным блоком, формирующим выходной сигнал (рис. 5).

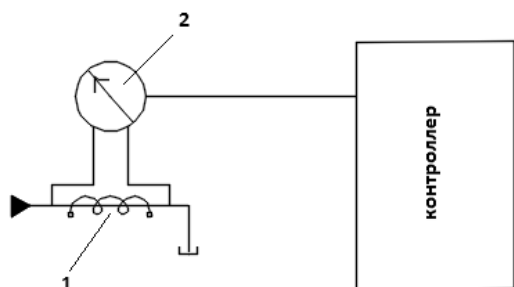


Рис. 4. Включение дифференциального манометра в автоматизированную систему: 1 – магнитоореологическое дросселирующее устройство, 2 – дифференциальный цифровой манометр

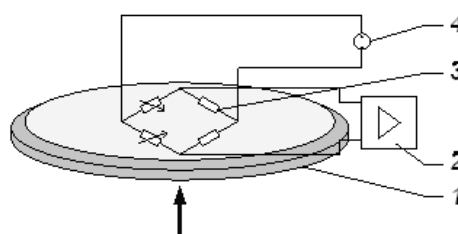


Рис. 5. Схема тензопреобразователя давления дифференциального манометра: 1 – мембрана, 2 – измерительная схема, 3 – тензометрический мост, 4 – источник питания

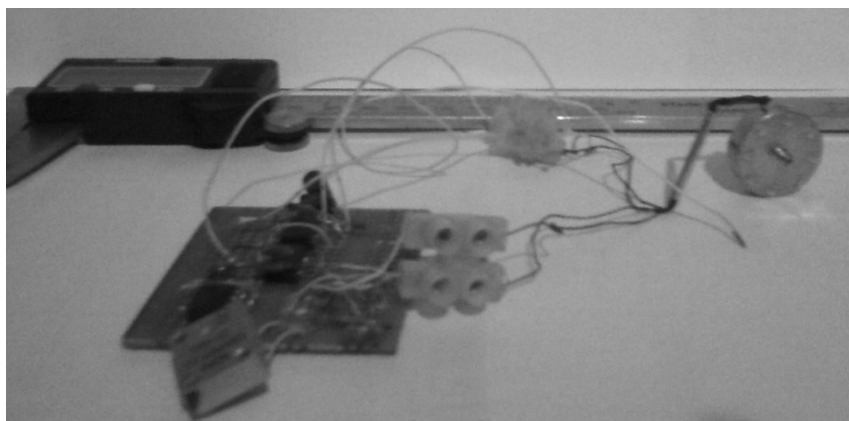


Рис. 6. Дифференциальный манометр

Дифференциальный манометр в сборке (рис. 6).

Получаемым выходным сигналом тензодатчика является аналоговый, следовательно, для обработки его микропроцессором необходимо усиление и оцифровка сигнала. Для реализации аналого-цифрового преобразования и усиления сигнала тензодатчика разности давлений, применима функциональная измерительная схема, изображенная на рис. 7.

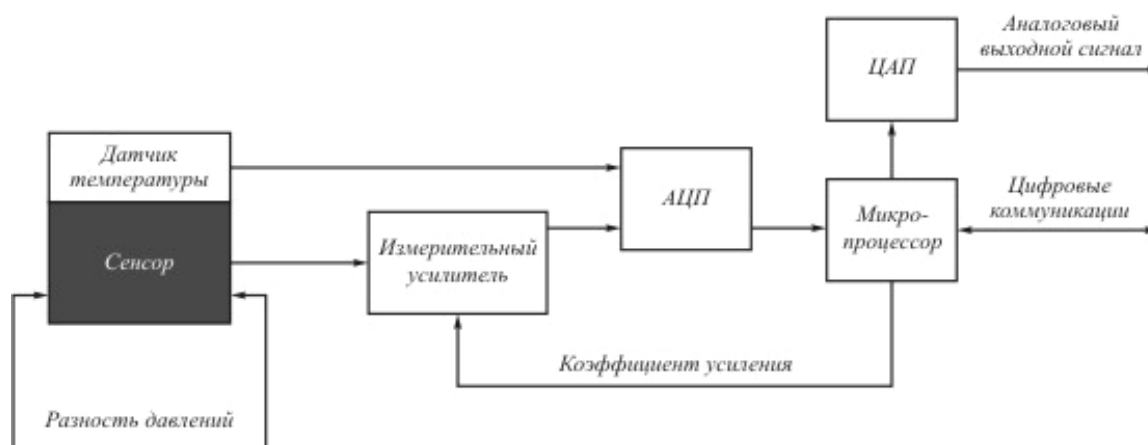


Рис. 7. Функциональная схема тензодатчика разности давления

Очевидно, что рост вязкости магнитореологической жидкости во внешнем магнитном поле приводит к увеличению потерь энергии на гидродинамическое трение в объеме рабочей среды и росту тепловыделения.

Воздействие внешнего электромагнитного поля на частицы ферромагнетика, образующего магнитореологическую жидкость, вызывает повышение кинетической энергии ферромагнетика, а взаимодействие ферромагнитных частиц с частицами жидкости носителя приводит к повышению кинетической энергии жидкости носителя и способствует росту кинетической энергии объема рабочей среды в целом, часть которой трансформируется в тепловую энергию. Особенно интенсивное тепловыделение происходит при циклическом изменении значений параметров магнитного поля, вследствие гистерезисных потерь энергии [12–14].

Тепловыделения возникают не только в объеме рабочей среды, но и в обмотках электромагнитов блока управления потоком магнитореологической жидкости и являются следствием протекания физических процессов трансформации и сохранения энергии [15–16].

При прохождении токов через обмотку электромагнитов блока электромагнитного управления также происходит трансформация энергии, часть которой рассеивается в виде тепла, следовательно, при эксплуатации магнитореологических систем необходимо обеспечить термостатирование рабочей среды. Термостатирование рабочей среды магнитореологических систем увеличивает срок службы как магнитореологической жидкости, так и электромагнитов блоков элект-

ромагнитного управления, позволяя реализовывать при помощи рабочей среды отвод тепла от них. Также термостатирование повышает надежность и прецизионность магнито-реологических приводов, сохраняя стабильность реологических свойств рабочей среды [17–20].

Желательна установка систем термостатирования перед определенными магнито-реологическими устройствами системы, например магнито-реологическими дросселирующими устройствами и осуществление индивидуального регулирования температурного режима рабочей среды для каждого из них. Особенно целесообразно применение подобной компоновки системы для прецизионных магнито-реологических приводов, в состав которых входят магнито-динамические насосы. Это предоставляет возможность термостатировать рабочую среду для магнито-реологических дросселирующих устройств без создания негативного эффекта понижения кинетической энергии рабочей среды за счет снижения ее температуры и повышения вязкости, так как наличие подобного эффекта нежелательно для объема магнито-реологической среды на входе в проточную полость магнито-динамического насоса [21–22].

Принципиальная схема включения магнито-реологических дросселирующих устройств в систему, предусматривающую термостатирование рабочей среды, приведена на рис. 8.

Реализация термостатирования рабочей среды возможна при помощи систем различной конструкции. При этом необходимо, чтобы данная система обладала требуемой мощностью, а также была автономна и компактна, что позволяло бы производить свободную компоновку приводной системы. Подобным требованиям отвечает система проточного термостатирования на базе термоэлектрических элементов Пельтье. Данная система термостатирования является не только автономной и компактной, но также управляется без промежуточной трансформации электрического управляющего сигнала и имеет возможность работы в импульсном режиме управления, что учитывая свойства полупроводников, является более энергоэффективным рабочим режимом, дающим более высокие показатели мощности при значительно меньшем потреблении электроэнергии (см. рис. 9).

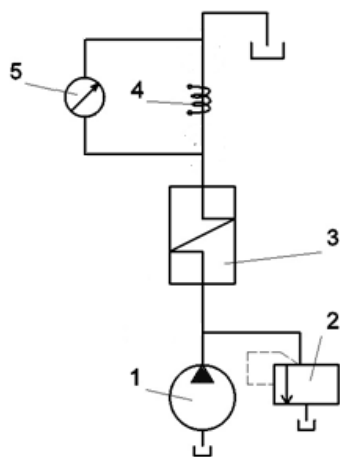


Рис. 8. Принципиальная гидравлическая схема включения магнито-реологических дросселирующих устройств в систему: 1 – предохранительный клапан, 2 – насос, 3 – теплообменник, 4 – магнито-реологическое дросселирующее устройство, 5 – дифференциальный манометр

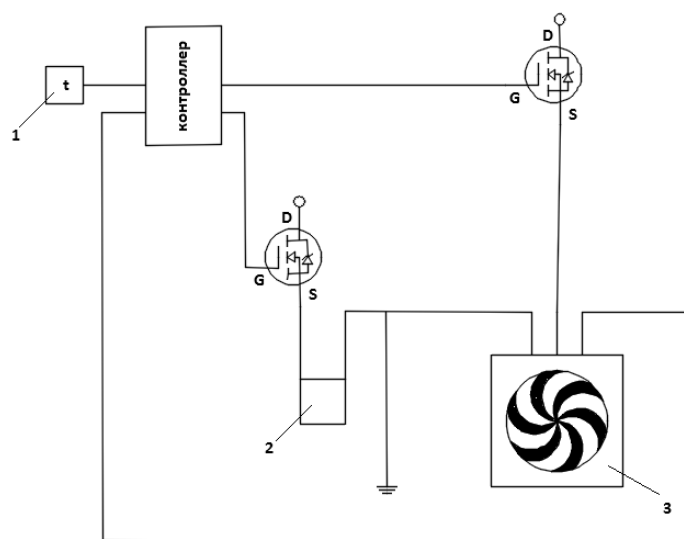


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема системы термостатирования: 1 – датчик температуры, 2 – элементы Пельтье, 3 – кулер

Применение системы проточного термостатирования облегчает решение задачи автоматизации рабочего процесса магнито-реологического дросселирующего устройства [23–25]. Управление системой проточного термостатирования организовано с помощью микроконтроллера.

Предложенная система термостатирования может работать от любых источников постоянного тока 10–12 В для термоэлектрических элементов Пельтье и для кулера, но основным ее достоин-



Рис. 10. Система проточного термостатирования рабочей среды

ством является то, что процесс термостатирования не требует создания подвода и циркуляции охлаждающей среды, что определяет ее автономность, небольшие габариты и малый вес, при этом система обладает достаточно большой мощностью (рис. 10).

3. Экспериментальные исследования и полученные результаты. Рассмотрим сопоставление результатов натурных экспериментов с результатами численного моделирования для двух магнитоологических жидкостей с различной начальной вязкостью и рабочей частотой управляющего электромагнитного поля, равной $\omega_m = 10$ Гц.

В первом случае, с вязкостью рабочей среды

$\vartheta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ и вольт-амперной характеристикой в диапазоне $U = [0-12] \text{ В}$; $I = [0-2] \text{ А}$.

Произведен расчет статических характеристик магнитоологического дросселя при трех значениях мощности блоков электромагнитного управления потоком магнитоологической жидкости, рис. 11 (линии):

1 – 0 Вт, 2 – 11 Вт, 3 – 22 Вт.

Экспериментально получены статические характеристики магнитоологического дросселя при трех значениях мощности блоков электромагнитного управления потоком магнитоологической жидкости, рис. 11 (точки):

1 – 0 Вт, 2 – 11 Вт, 3 – 22 Вт.

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных (см. рис. 11) демонстрирует их полное совпадение для первой графической зависимости и высокую степень совпадения для второй графической зависимости, что указывает на высокую точность управления расходом и получаемым перепадом давления на дросселе. Следовательно, в данном диапазоне мощностей блоков управления магнитоологического дросселя, можно производить управление его статическими характеристиками с достаточно высокой точностью. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных для третьей графической зависимости (см. рис. 11) демонстрирует не очень высокую степень их совпадения. Это указывает на то, что эксплуатация на предельно возможных рабочих режимах блоков управления магнитоологических дросселей нежелательна, так как очевидно, приводит к интенсивному нагреву магнитоологической среды, причем в целом по объему, поэтому охлаждение объема по поверхности не приносит должных результатов, а также приводит к нагреву самих блоков управления магнитоологических дросселей. Это создает неоднородность и нестабильность управляющего магнитного поля и влечет размагничивание магнитных частиц.

Во втором случае с вязкостью рабочей среды $\vartheta = 40 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ и вольт-амперной характеристикой $U = 0$ и 11 В; $I = 0$ и 1 А.

Произведен расчет статических характеристик магнитоологического дросселя при двух значениях мощности блоков электромагнитного управления потоком магнитоологической жидкости, рис. 12 (линии):

1 – 0 Вт, 2 – 11 Вт.

Экспериментально получены статические характеристики магнитоологического дросселя при двух значениях мощности блоков электромагнитного управления потоком магнитоологической жидкости, рис. 12 (точки):

1 – 0 Вт, 2 – 11 Вт.

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных (см. рис. 12) демонстрирует их высокую степень совпадения, следовательно, высокую точность управления расходом и получаемым перепадом давления на дросселе.

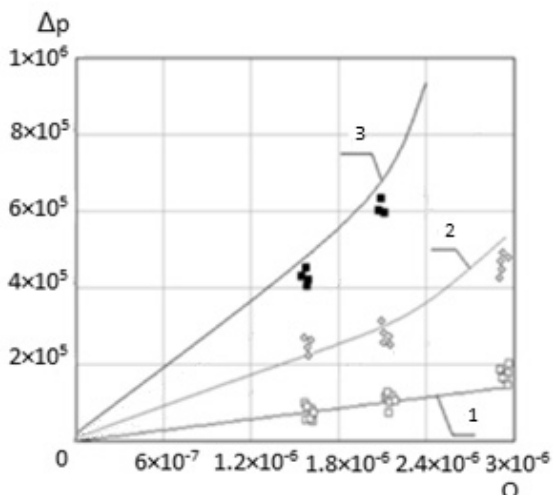


Рис. 11. Статическая характеристика магнитореологического дросселя (линии – результаты численного моделирования, точки – экспериментальные данные), Δp , Па; Q , м³/с

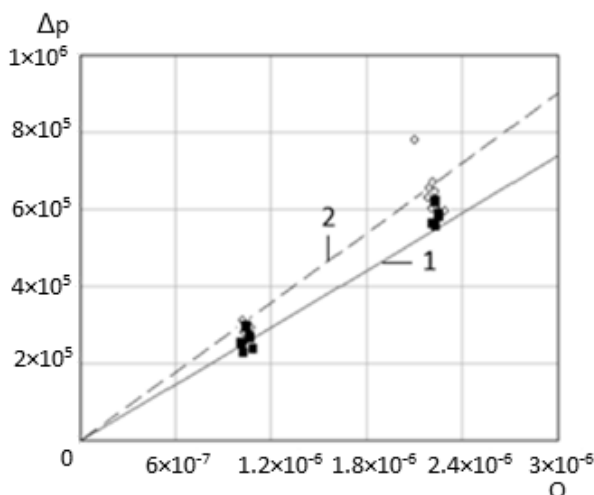


Рис. 12. Статическая характеристика магнитореологического дросселя (линии – результаты численного моделирования, точки – экспериментальные данные), Δp , Па; Q , м³/с

В целом погрешность в управлении не превышает 5 % при номинальных рабочих режимах блока электромагнитного управления магнитореологического дросселя, а для ряда рабочих режимов наблюдается почти полное совпадение экспериментальных и расчетных данных. Также наблюдается стабильная воспроизводимость экспериментальных и расчетных данных для рабочих сред с различной начальной вязкостью, то есть независимо от степени тепловыделений, протекающих в объеме рабочей среды.

Заключение. Разработанная система автоматизации рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства позволяет производить регулирование параметров управляющего магнитореологического контура в режиме реального времени посредством контроллера, что дает возможность осуществлять автономную эксплуатацию мехатронных систем, оснащенных магнитореологическими приводами. Очевидно, что достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных указывает на высокую эффективность данного инженерного решения, примененного для автоматизации рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства. Использование подобных инженерных решений в автоматизации рабочего процесса магнитореологических дросселирующих устройств в системах управления прецизионной механикой позволит значительно увеличить точность перемещения исполнительных элементов, повысит быстродействие систем и срок эксплуатации магнитореологической среды, а также улучшит показатели надежности мехатронных систем.

Литература

1. Гаркунов, Д.Н. *Триботехника. Конструирование, изготовление и эксплуатация машин* / Д.Н. Гаркунов. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 632 с.
2. Попов, Д.Н. *Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем* / Д.Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1976. – 424 с.
3. Смык, А.Ф. *Физика. Электромагнетизм: курс лекций* / А.Ф. Смык. – М.: МГУП, 2007. – 160 с.
4. *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
5. Martinez, B. *Magnetic Properties of Gamma-Fe₂O₃ Nanoparticles Obtained by Vaporization Condensation in a Solar Furnace* / B. Martinez, A. Roig, X. Obradors // *J. Appl. Phys.* – 1996. – Vol. 79. – P. 2580–2586. DOI: 10.1063/1.361125
6. *Multifunctional Properties Related to Magnetostructural Transitions in Ternary and Quaternary Heusler Alloys* / I. Dubenko, A. Quetz, S. Pandey et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2015. – Vol. 383. – P. 186–189. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.10.083
7. *Magnetization reversal of Ferromagnetic Nanoparticles Induced by a Stream of Polarized Elec-*

trons / M.A. Kozhushner, A.K. Gatin, M.V. Grishin et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016. – Vol. 414. – P. 38–44. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.04.045

8. *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

9. *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

10. *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

11. *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

12. Бубенчиков А.М. *Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях* / А.М. Бубенчиков, С.Н. Харламов. – Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2001. – 448 с.

13. *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

14. *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/qjmam/57.4.599

15. *A Simple Model of a High Temperature PEM Fuel Cell* / O. Shamardina, A. Chertovich, A.A. Kulikovskiy, A.R. Khokhlov // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2010. – Vol. 35, no. 18. – P. 9954–9962. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.012

16. Фройштетер, Г.Б. *Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах* / Г.Б. Фройштетер, С.Ю. Данилевич, Н.В. Радионова. – Киев: Наукова думка, 1990. – 216 с.

17. *Magneto Caloric Properties of Manganese (III) Porphyrins Bearing 2,6-Di-Tert-Butylphenol-groups* / V.V. Korolev, T.N. Lomova, A.N. Maslennikova et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016. – Vol. 401. – P. 86–90. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.10.014

18. Виноградов, Н.В. *Как самому рассчитать и сделать электродвигатель* / Н.В. Виноградов, Ю.Н. Виноградов. – М.: Энергия, 1974. – 168 с.

19. *Filipcsei, G. Magnetodeformation Effects and the Swelling of Ferrogels in a Uniform Magnetic Field* / G. Filipcsei, M. Zrinyi // *J. Phys. Condens.* – 2010. – Matter 22. – P. 276001. DOI: 10.1088/0953-8984/22/27/276001

20. Котур, В.И. *Электрические измерения и электрические приборы* / В.И. Котур, М.А. Скомская, Н.Н. Храмова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.

21. Бессонов, Л.А. *Теоретические основы электротехники* / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1996. – 638 с.

22. *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

23. *Refractive Index Sensor Based on Magnetoplasmonic Crystals* / A.A. Grunin, I.R. Mukha, A.V. Chetvertukhin, A.A. Fedyanin // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016.

24. *New Manganite-Based Mediators for Self-Controlled Magnetic Heating* / O.A. Shlyakhtin, V.G. Leontiev, O. Young-Jei, A.A. Kuznetsov // *Smart Materials and Structures*. – 2007. – Vol. 16, no. 5. – P. 35–39. DOI: 10.1088/0964-1726/16/5/N02

25. *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

Найгерт Катарина Валерьевна, соискатель кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, kathy_naigert@mail.ru.

Редников Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, srednikov@mail.ru.

Поступила в редакцию 28 апреля 2016 г.

THE WORKFLOW AUTOMATION SYSTEM FOR MAGNETORHEOLOGICAL CONTROL DEVICE

K.V. Naigert, kathy_naigert@mail.ru,

S.N. Rednikov, srednikov@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article analyzes the elements of the magnetorheological drive systems. It is examining the way of the regulating of discharge in the control flow path by means of magnetorheological control device and is provided the method of workflow automation for magnetorheological control device. It describes the ways to implement the transmission of control signals and reverse communication by pressure. It presents the method for the calculation of control signal by micro-controller and the example of one control algorithm.

The text covers the electrical schematic circuit diagram for workflow of magnetorheological control device; this allows the use of the magnetorheological control devices in the actuators of automatic and mechatronic systems. It describes the way to implement the workflow of magnetorheological control devices by means of differential pressure gauge. It also describes a functional scheme the operation of the differential pressure gauge.

The authors offer the hydraulic schematic circuit diagram to include the magnetorheological control device in the control magnetorheological flow path with the thermostatic system which allows the temperature regulation of the rheological properties of magnetorheological fluid. It presents the method to implement the temperature control of working fluid in the magnetorheological systems.

It is discussed the features of thermostatic control systems which is established on the basis of thermoelectric semiconductor elements. It describes the advantages of the using of proposed system. It shows the static characteristics of the magnetorheological control devices in automatic mode of fixed flow characteristics. It is analyzed the results of field experiment and made a comparison with the results of numerical modeling of workflow for magnetorheological control devices.

The effectiveness of a method of workflow automation of the magnetorheological control device is confirmed with calculations and experiments.

Keywords: automated systems, magnetorheological actuators, magnetorheological control devices, throttling devices, workflow automation, differential pressure gauge, the temperature control of working fluid, strain gauge bridge, magnetorheological fluid control orifices.

References

1. Garkunov D.N. *Tribotekhnika. Konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin* [Tribotechnology. Design, Manufacture and Operation of the Machine]. Moscow, MSKHA, 2002. 632 p.
2. Popov D.N. *Dinamika i regulirovaniye gidro- i pnevmosistem* [Dynamics and Regulation of Hydraulic and Pneumatic Systems]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1976. 424 p.
3. Smyk A.F. *Fizika. Elektromagnetizm. Kurs lektsiy* [Physics. Electromagnetism. Lectures]. Moscow, MGUP, 2007. 160 p.
4. 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
5. Martinez B., Roig A., Obradors X. Magnetic Properties of Gamma-Fe₂O₃ Nanoparticles Obtained by Vaporization Condensation in a Solar Furnace. *J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 79, pp. 2580–2586. DOI: 10.1063/1.361125
6. Dubenko I., Quetz A., Pandey S. Multifunctional Properties Related to Magnetostructural Transitions in Ternary and Quaternary Heusler Alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 383, pp. 186–189. DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.10.083
7. Kozhushner M.A., Gatin A.K., Grishin M.V. Magnetization reversal of Ferromagnetic Nanoparticles Induced by a Stream of Polarized Electrons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 414, pp. 38–44. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.04.045
8. Kramarenko E.Y., Chertovich A.V., Stepanov G.V. Magnetic and Viscoelastic Response of Elas-

tomers with Hard Magnetic Filler. *Smart Materials and Structures*, 2015, vol. 24, pp. 035002. DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/035002

9. 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, pp. 3448–3451. DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.02.062

10. 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

11. Bustamante R., Dorfmann A., Ogden R.W. On Variational Formulations in Nonlinear Magnetoelastostatics. *Math. Mech. Solids.*, 2008, vol. 13, pp. 725. DOI: 10.1177/1081286507079832v1

12. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Matematicheskiye modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentnosti vo vnutrennikh techeniyakh* [Mathematical Models of Inhomogeneous Anisotropic Turbulence in the Internal Flows]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2001. 448 p.

13. 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

14. Dorfmann A., Ogden R.W. Nonlinear Magnetoelastic Deformations. *J. Mech. Appl. Math.*, 2004, vol. 57 (4), pp. 599–622. DOI: 10.1093/qjmam/57.4.599

15. Shamardina O., Chertovich A., Kulikovskiy A.A., Khokhlov A.R. A Simple Model of a High Temperature PEM Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, no. 18, pp. 9954–9962. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.012

16. Frayshteter G.B., Danilevich S.Y., Rodionova N.V. *Techniye i teploobmen nen'yutonovskikh zhidkostey v trubakh* [Flow and Heat Transfer of Non-Newtonian Fluids in the Pipes]. Kiev, Naukova dumka, 1990. 216 p.

17. Korolev V.V., Lomova T.N., Maslennikova A.N. Magneto Caloric Properties of Manganese (III) Porphyrins Bearing 2,6-Di-Tert-Butylphenolgroups. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 401, pp. 86–90. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.10.014

18. Vinogradov N.V., Vinogradov Yu. N. *Kak samomu rasschitat' i sdelat' elektrodvigatel'* [How to Calculate and to Make Motor]. Moscow, Energiya, 1974. 168 p.

19. Filipcei G., Zrínyi M. Magnetodeformation Effects and the Swelling of Ferrogels in a Uniform Magnetic Field. *J. Phys. Condens.*, 2010, Matter 22, pp. 276001. DOI: 10.1088/0953-8984/22/27/276001

20. Kotur V.I. *Elektricheskiye izmereniya i elektricheskiye pribory* [Electrical Measurements and Electrical Appliances]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 400 p.

21. Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Moscow, Vyssh. shkola, 1996. 638 p.

22. 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

23. Grunin A.A., Mukha I.R., Chetvertukhin A.V., Fedyanin A.A. Refractive Index Sensor Based on Magnetoplasmonic Crystals. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016.

24. Shlyakhtin O.A., Leontiev V.G., Young-Jei O., Kuznetsov A.A. New Manganite-Based Mediators for Self-Controlled Magnetic Heating. *Smart Materials and Structures*, 2007, vol. 16, no. 5, pp. 35–39. DOI: 10.1088/0964-1726/16/5/N02

25. Bohm V., Naletova V.A., Popp J. 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

Received 28 April 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Найгерт, К.В. Автоматизация рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства / К.В. Найгерт, С.Н. Редников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 23–32. DOI: 10.14529/engin160203

FOR CITATION

Naigert K.V., Rednikov S.N. The Workflow Automation System for Magnetorheological Control Device. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 23–32. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin160203