

# КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

К.В. Найгерт<sup>1</sup>, В.А. Целищев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

Приводы мобильных машин эксплуатируются в условиях интенсивно изменяющихся температур. Устойчивость рабочих параметров приводных систем, применяющих рабочую жидкость в качестве кинематического звена, напрямую зависит от температуры среды. Для стабилизации температуры рабочей среды необходима реализация ее термостатирования. К массогабаритным показателям систем терморегулирования мобильных машин предъявляют жесткие требования, так как лишняя масса готового изделия повышает расход топлива, а большие размеры элементов создают трудности при их компоновке и монтаже. В гидравлических и магнитореологических системах посредством рабочей жидкости происходит перенос энергии от источника давления к исполнительному элементу, в жидкости протекают соответствующие процессы трансформации кинетической энергии в потенциальную энергию, изменения их значений в ответ на сигналы управления за счет различных устройств или механизмов. Рабочие характеристики и динамика рабочих процессов приводов определяется динамикой трансформации и переноса энергии в них. Очевидно, что динамика энергетических процессов гидравлических и магнитореологических систем зависит от физических параметров рабочих жидкостей и прежде всего от температуры. Это вызывает необходимость уделять повышенное внимание эффективности систем терморегулирования. Развитие приводных технологий требует совершенствования систем терморегулирования, так как существующие системы терморегулирования неспособны соответствовать постоянно повышающимся стандартам. В работе рассмотрена гибридная система терморегулирования для гидравлических и магнитореологических приводов, применяющая сочетание термоэлектрических элементов и одноступенчатой маломощной компрессорной установки, отличающаяся высокой производительностью, значительной энергоэффективностью и небольшими массогабаритными показателями. Описана численная модель, позволяющая проводить тепловой расчет подобных гибридных систем терморегулирования и определять динамику тепловых процессов, протекающих в их рабочих средах. Даны базовые рекомендации по проектированию и рациональной эксплуатации гибридных систем терморегулирования данного типа.

*Ключевые слова:* гидравлические приводы, магнитореологические приводы, системы терморегулирования, рабочие среды, энергетические процессы.

## Введение

В качестве систем терморегулирования и охлаждения широко применяются компрессорные холодильные машины, но высокопроизводительное компрессорное оборудование имеет большие массогабаритные показатели и немалую стоимость, так как значительные перепады температур в компрессорах реализуются путем создания многоступенчатых конструкций рабочих камер, клапанов и систем уплотнений, работающих при больших положительных и отрицательных температурах, перепадах давления. Процессы сжатия хладагента высоко энергозатратны, что приводит к значительным эксплуатационным расходам и вероятности перегрева компрессоров. Серьезной проблемой являются сложности, возникающие при сервисном обслуживании элементов рабочих камер компрессоров и их низкая ремонтпригодность. Поэтому установка высокопроизводительных компрессорных холодильных систем на приводы мобильных машин существенно повышает массогабаритные показатели конечных изделий, увеличивает расход топлива и усложняет проведение сервисных мероприятий. Это создает потребность поиска новых конструктивных решений. Системы терморегулирования на полупроводниковых термоэлектрических элементах потребляют значительно меньше электроэнергии, в сравнении с компрессорными холодильными машинами, при равной производительности установок. Термоэлектрические элементы Пельтье позво-

## Расчет и конструирование

ляют создавать разность температур сторон до 70 °С и отрицательные температуры на холодной стороне термоэлектрического элемента в однокаскадных конструкциях устройств управления термодинамическими параметрами, при этом обладая малыми габаритами и массой. Возможно исполнение системы терморегулирования с воздушным или жидкостным охлаждением горячей стороны термоэлектрического элемента, но применение жидкостного охлаждения является более рациональным, так как жидкость позволяет отводить значительные потоки тепла при циркуляции малых объемов хладагента, создавая достаточный градиент температур на сторонах термоэлектрического элемента. Поддержание температуры горячей стороны термоэлектрического элемента равной температуре окружающей среды приводит к снижению температуры его холодной стороны на десятки градусов. Это дает возможность реализовывать высокоэффективные системы терморегулирования на одноступенчатых маломощных компрессорных установках [1–14].

### Актуальность

Эффективность систем определяется рациональностью их конструкций и оптимальностью параметров рабочих процессов, которые утверждаются в технических заданиях еще на начальных стадиях проектирования. На сегодняшний день не существует универсальных общепризнанных методик конструирования и расчета гибридных систем терморегулирования для гидравлических и магнито-реологических приводов, применяющих сочетание термоэлектрических элементов и компрессорных установок, что затрудняет процессы проектирования и снижает достоверность получаемых результатов численного моделирования. Увеличение срока эксплуатации технических средств достигается, прежде всего, соблюдением требований, предъявляемых к значениям их рабочих параметров и качеству проведенных сервисных и ремонтных работ, но при этом рекомендации по эксплуатации, сервисному обслуживанию и ремонту подобных систем отсутствуют. Поэтому исследовательская деятельность в данном направлении является актуальной.

### Конструктивное решение

Варианты конструкций систем терморегулирования, предусматривающих отвод тепла посредством жидкой среды, являются более высокоэффективными, на рис. 1 приведена схема холодильной машины. Распределение хладагента осуществляется четырехходовым краном. Горячий хладагент из компрессора конденсируется, поступая в теплообменник, отдавая тепло к внешней среде. Через регулирующий вентиль хладагент поступает в реологический дроссель-термостат, закипая, охлаждает горячую сторону термоэлектрического элемента. Отработанные пары хладагента отводятся во всасывающую линию компрессора. Температура хладагента, поступающего в реологический дроссель-термостат, регулируется степенью изменения его компрессии в рабочей камере. Термоэлектрические элементы Пельтье способны работать в режиме термоциклирования, что достигается изменением полярности источника постоянного тока и приводит к смене горячей и холодной сторон. Устройство управления термодинамическими параметрами магнито-реологической рабочей среды выполнено в виде многоугольной сборки термоэлектрических элементов Пельтье, рис. 2, 3. Подробная конструкция и принцип работы реологического дросселя-термостата описаны в Патенте RU 173746 [15].

Тепловые процессы, протекающие в рабочей среде, опишем следующими уравнениями [1–4, 16–19]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i T_i) + \operatorname{div} (\rho_i u_i T_i) = \operatorname{div} (D_i \operatorname{grad} T_i) + S_{T_i}.$$

Член уравнения  $\operatorname{div} (\rho_i u_i T_i)$ :

$$\operatorname{div} (\rho_i u_i T_i) = \operatorname{div} \left( \frac{\lambda_i}{c_{pi}} \operatorname{grad} T_i \right) + \frac{S_{h_i}}{c_{pi}},$$

$S_{h_i}$  – объемная скорость выделения теплоты:

$$S_{h_i} = \frac{S_{T_i}}{c_{pi}},$$

где  $c_{pi}$  – теплоемкость,  $D_i$  – коэффициент диффузии,  $T_i$  – температура,  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности,  $t$  – время,  $\rho_i$  – плотность.

Член уравнения  $\operatorname{div} (D_i \operatorname{grad} T_i)$ :

$$(D_i \operatorname{grad} T_i) = D_0 \exp \left( - \frac{E_a}{R \frac{dT_i}{dx}} \right),$$

где  $D_0$  – значение коэффициента диффузии, при температуре  $T_0$ ,  $E_a$  – энергия активации,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Член уравнения  $S_{T_i}$ :

$$S_{T_i} = S_{C_i} + S_{P_i} T.$$

Член уравнения  $\text{div} (\lambda_i \text{grad } T_i)$ :

$$\left( -\frac{\lambda_1}{c_{p1}} \text{grad } T \right) \Big|_{\Gamma_1} = \alpha_1 \rho_1 (T_1 - T_{\Gamma_1}) \Big|_{\Gamma_1},$$

$$\left( -\frac{\lambda_2}{c_{p2}} \text{grad } T \right) \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_2 \rho_2 (T_2 - T_{\Gamma_2}) \Big|_{\Gamma_2},$$

где  $\rho_1; \rho_2$  – плотности сред,  $\alpha_1; \alpha_2$  – средний по поверхности коэффициент теплоотдачи среде,  $\lambda_1; \lambda_2$  – коэффициент теплопроводности,  $T_1; T_2$  – температура стенок, смачиваемых средами,  $T_{\Gamma_1}; T_{\Gamma_2}$  – температура сред.

$$\alpha_1 = \frac{q_1}{dT}, \alpha_2 = \frac{q_2}{dT}.$$

Плотность теплового потока в хладагенте:

$$q_1 = -k_1 A_1 \frac{dT}{dx}.$$

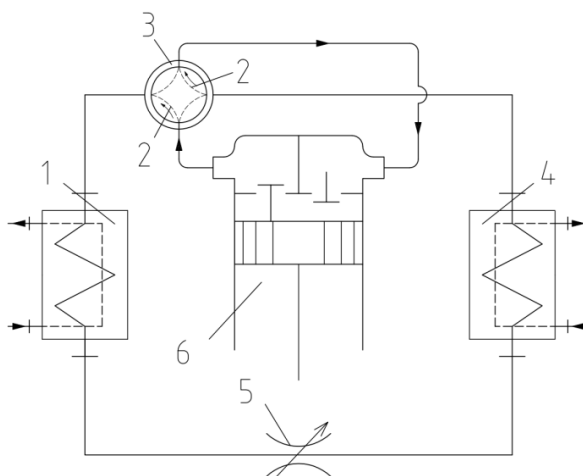


Рис. 1. Система терморегулирования: 1 – теплообменник, 2 – направление движения хладагента при охлаждении термоэлектрических элементов, 3 – четырехходовой кран-переключатель, 4 – реологический дроссель-термостат, 5 – дроссель, 6 – компрессор

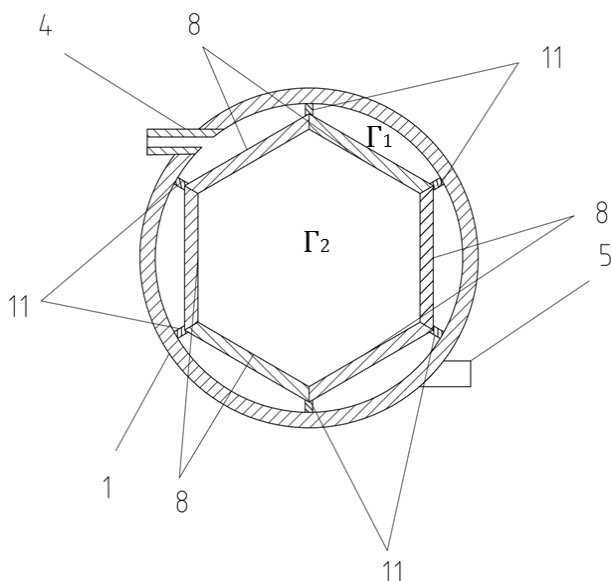
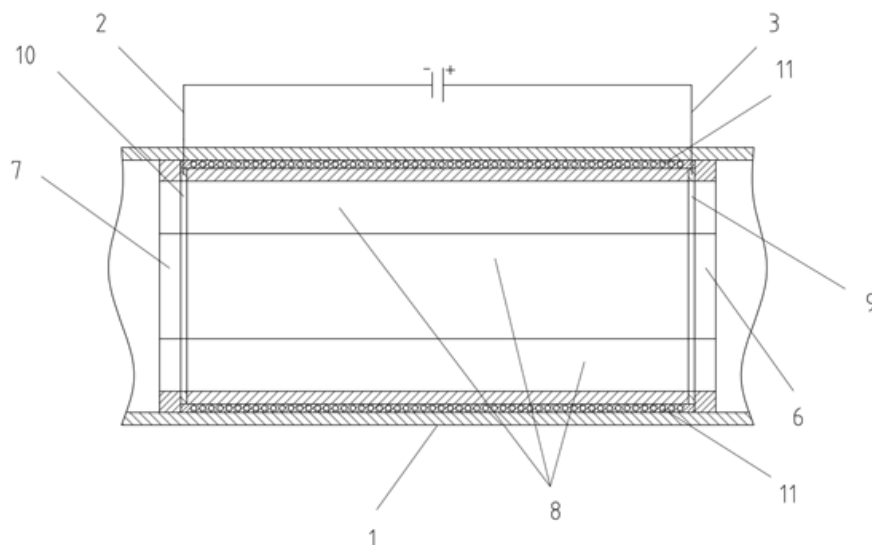


Рис. 2. Реологический дроссель-термостат: 1 – гидролиния, 4, 5 – патрубки, 8 – полупроводниковые термоэлектрические элементы, 11 – перфорированная пластина



**Рис. 3.** Реологический дроссель-термостат: 1 – гидролиния, 2, 3 – тоководы, 6, 7 – герметизирующая пластина, 9, 10 – токопроводящая пластина, 8 – полупроводниковые термоэлектрические элементы, 11 – перфорированная пластина

Плотность теплового потока в магнитореологической рабочей среде:

$$q_2 = -k_2 A_2 \frac{dT}{dx},$$

где  $\frac{dT}{dx}$  – градиент температуры сред,  $A_1; A_2$  – площадь соприкосновения,  $k_1; k_2$  – коэффициенты теплопроводности.

Член уравнения  $\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i T_i)$ :

$$(\rho_i T_i) = \rho^{20} \pm \gamma(T_c \pm 20),$$

где  $\rho^{20}$  – плотность жидкой среды при 20°C,  $\gamma$  – средняя температурная поправка на 1°C,  $T_c$  – температура в Цельсиях.

Тепловые эффекты в хладагенте:

$$S_{C_1} = 0,$$

$$S_{P_1} = -\frac{k_1 A_1}{V_1},$$

где  $V_1$  – эффективный объем хладагента.

Тепловые эффекты в магнитореологической рабочей среде:

$$S_{C_2} = \frac{k_2 \frac{dT}{dx} A_2}{V_2},$$

$$S_{P_2} = 0,$$

где  $V_2$  – эффективный объем магнитореологической рабочей среды.

Установим количество тепла, которое холодильная машина отнимает от охлаждаемой среды в единицу времени – холодопроизводительность [20–32].

Рабочая холодопроизводительность компрессора:

$$Q_{0w} = V_h \theta_w q_{uw}.$$

Стандартная холодопроизводительность компрессора:

$$Q_{0s} = V_h \theta_s q_{us},$$

где  $q_{uw}; q_{us}$  – объемная холодопроизводительность,  $\theta_w; \theta_s$  – коэффициент подачи хладагента.

Объем поршневой полости компрессора:

$$V_h = \frac{\pi d^2}{4} s n Z,$$

где  $Z$  – число рабочих камер,  $d$  – диаметр рабочих камер,  $n$  – частота вращения вала компрессора,  $s$  – ход поршня.

Расчет холодопроизводительность компрессора при неустановившемся режиме:

$$Q_{0w} = \frac{Q_{0s} \theta_w q_{uw}}{\theta_s q_{us}}.$$

Температура кипения хладагента:

$$T_{\text{с0}} = \theta_q T_{\text{сс}},$$

где  $\theta_q$  – коэффициент подогрева,  $T_{\text{сс}}$  – температура конденсации.

На основе численной модели получены зависимости, описывающие тепловые процессы в гибридной системе терморегулирования.

### Результаты

Основным параметром, по которому можно оценивать реологические и термодинамические характеристики рабочей среды является ее плотность. Как известно, именно плотность заполнения рассматриваемого объема молекулами среды определяет интенсивность процессов теплопроводности и диффузии в нем. Следовательно, изменения плотности оказывает влияние на значения каждого члена уравнения, описывающего тепловые процессы, протекающие в рабочей среде. Поэтому смоделируем динамику изменения плотности в рассматриваемом объеме, рис. 4.

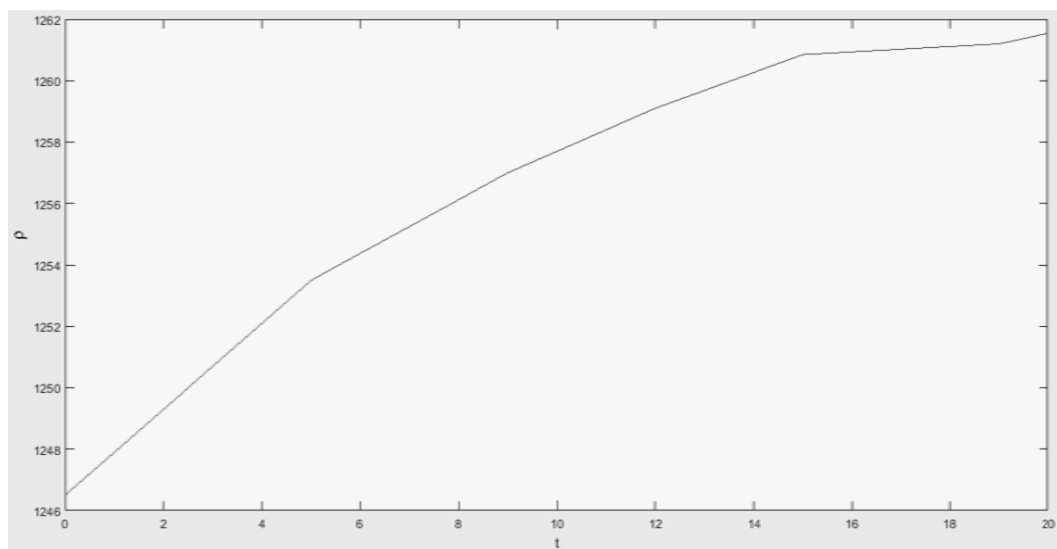


Рис. 4. Динамика изменения значений плотности магнитореологической среды во времени  $t$ [с];  $\rho$ [кг/м<sup>3</sup>]

Результаты численного моделирования свидетельствуют о достаточной скорости изменения значений плотности рабочей среды и в целом о высокой эффективности разработанной системы терморегулирования, несмотря на ее малые размеры и низкую мощность одноступенчатой компрессорной установки.

### Рекомендации по проектированию и эксплуатации

Основываясь на численной модели и расчетных данных, можно сформулировать следующие рекомендации:

Увеличение площади соприкосновения полупроводниковых термоэлектрических элементов со средами (увеличение количества полупроводниковых пар) при небольших значениях параметров вольтамперных характеристик существенно повышает эффективность рабочих процессов гибридных систем терморегулирования для гидравлических и магнитореологических приводов, применяющих сочетание термоэлектрических элементов и одноступенчатых маломощных компрессорных установок. Это обусловлено, во-первых тем, что теоретически при нулевой разности температур и при малых токах холодильный коэффициент термоэлектрического элемента в пределе стремится к бесконечности. Во-вторых, данный режим эксплуатации не приводит к большим затратам электроэнергии в компрессорном оборудовании, так как не требует значительных изменений объемов хладагента. Оптимальное значение геометрических и рабочих параметров полупроводниковых термоэлектрических элементов следует определять из условия меньших затрат энергии именно в компрессорной установке.

Достижение требуемых рабочих температур в магнитореологической среде осуществляется путем задания вольтамперной характеристики термоэлектрических элементов и температуры хладагента.

## Расчет и конструирование

Корректировка значений температуры магнитореологической среды производится за счет изменения вольтамперной характеристики термоэлектрических элементов.

Стабильность рабочих характеристик системы терморегулирования во многом зависит от эффективности реализации отвода тепла от горячей стороны полупроводниковых термоэлектрических элементов, что требует устойчивости интенсивности циркуляции хладагента в охлаждающем контуре. Поэтому частота вращения вала компрессора определяется требуемой для охлаждения горячей стороны термоэлектрического элемента производительностью компрессора.

Динамические процессы в рабочей среде, прежде всего, зависят от ее плотности и значения коэффициента теплопроводности. Оптимизация динамики приводной системы должна производиться, в первую очередь, за счет выбора рабочих сред по рациональному соотношению значений данных физических параметров.

### Новизна исследовательской работы

Создана оригинальная запатентованная конструкция высокоэффективного устройства управления термодинамическими параметрами и корректировки их значений.

На основе проведенного анализа рабочих процессов системы терморегулирования рабочей среды (работа в составе привода мобильной машины) выработаны рекомендации по проектированию и эксплуатации подобных устройств управления термодинамическими параметрами и корректировки их рабочих параметров.

### Выводы

Применение сочетания термоэлектрических элементов и одноступенчатых маломощных компрессорных установок в системах терморегулирования позволяет достигать рабочих параметров, сопоставимых с рабочими параметрами высокопроизводительного многоступенчатого компрессорного оборудования.

Гибридные системы терморегулирования гидравлических и магнитореологических приводов, применяющие сочетание термоэлектрических элементов и одноступенчатых маломощных компрессорных установок, обладают большой энергоэффективностью.

Использование одноступенчатых маломощных компрессорных установок в системах терморегулирования в значительной степени снижает стоимость их производства.

Термоэлектрические элементы дают возможность создавать высокоэффективные системы терморегулирования с низкими массогабаритными показателями.

### Литература

1. Попов, Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д.Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1976. – 424 с.
2. Свешников, В.К. Станочные гидроприводы / В.К. Свешников, А.А. Усов. – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
3. Чупраков, Ю.И. Гидропривод и средства гидроавтоматики / Ю.И. Чупраков. – М.: Машиностроение, 1979. – 232 с.
4. Смык, А.Ф. Физика. Электромагнетизм: курс лекций / А.Ф. Смык. – М.: МГУП, 2007. – 160 с.
5. Steven, R.A. A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials / R.A. Steven, A.S. Henry // *Smart Mater. Struct.* – 2007. – Vol. 16, no. 1 – P. 43–50. DOI:10.1088/0964-1726/16/3/R01
6. Денисов, А.А. Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики / А.А. Денисов, В.С. Нагорный. – Л.: Машиностроение, 1979. – 257 с.
7. Naigert, K.V. The rotating magnetorheological fluid technologies in actuators of industrial automation systems / K.V. Naigert // *Innovations in modern science*. – Neftekamsk: Scientific Publishing Center World of Science; Praha: Publishing house Osvícení, 2017. – P. 102–113.
8. Naigert, K.V. The realization principles of new generation magnetorheological systems / K.V. Naigert // *Modern science: current issues and development prospects*. – Neftekamsk: Scientific Publishing Center World of Science; Sofia: Publishing house SORoS, 2017. – P. 132–147.
9. 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
10. Magnetization reversal of Ferromagnetic Nanoparticles Induced by a Stream of Polarized Electrons / 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

11. *Magnetic Properties of Gamma-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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
12. *Magnetic and Mössbauer Spectroscopy Studies of Hollow Microcapsules Made of Silica-Coated CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles* / I. S. Lyubutin, N. E. Gervits, S. S. Starchikov et al. // *Smart Materials and Structures.* – 2015. – Vol. 25, no. 1. – P. 015022. DOI: 10.1088/0964-1726/25/1/015022
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. *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
15. Пат. 173746 Российская Федерация. Реологический дроссель-термостат / К.В. Найгерт, В.Т. Тутьнин. – Оpubл. 07.09.2017, Бюл. № 25.
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. *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
18. Бибик, Е.Е. Реология дисперсных систем / Е.Е. Бибик. – Л.: Изд-во. Ленингр. ун-та, 1981. – 172 с.
19. *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
20. *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
21. *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
22. Гусев, В.В. Физические основы проектирования оборудования: учеб. пособие / В.В. Гусев, В.К. Самойликов. – М.: МИЭТ, 1999. – 141 с.
23. *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
24. *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. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.03.069
25. *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
26. Булат, Л.П. Термоэлектрические охлаждающие устройства / Л.П. Булат, Е.В. Бузин. – СПб.: СПбГУНУИТ, 2001. – 41 с.
27. *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
28. *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
29. *Carlson, J.D. MR Fluid, Foam and Elastomer Devices* / J.D. Carlson, M.R. Jolly // *Mechatronics.* – 2000. – Vol. 10. – P. 555–569. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00064-1
30. *Magneto Caloric Properties of Manganese (III) Porphyrins Bearing 2,6-Di-Tert-Butylphenolgroups* / 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
31. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
32. Такетоми, С. Магнитные жидкости / С. Такетоми, С. Такадзуми. – М.: Мир, 1993. – 272 с.

**Найгерт Катарина Валерьевна**, кандидат технических наук, докторант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, [kathy\\_naigert@mail.ru](mailto: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](mailto:pgl.ugatu@mail.ru).

*Поступила в редакцию 30 мая 2018 г.*

---

DOI: 10.14529/engin180305

## DESIGN OF HIGH-PERFORMANCE THERMAL CONTROL SYSTEMS OF HYDRAULIC AND MAGNETORHEOLOGICAL DRIVES FOR MOBILE MACHINERY

**K.V. Naigert<sup>1</sup>**, [kathy\\_naigert@mail.ru](mailto:kathy_naigert@mail.ru),  
**V.A. Tselischev<sup>2</sup>**, [pgl.ugatu@mail.ru](mailto:pgl.ugatu@mail.ru)

<sup>1</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup>Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

Drives for mobile machinery are used at changing temperature conditions. Steadiness of operating parameters for drive systems depends on temperature of environments because they apply the working fluid as a kinematic element. Temperature stabilization of working environment is realized by thermal control systems. Mobile machineries have strict requirements for mass and scale of thermal control systems. Extra weight of finished product increases fuel consumption and large scales of elements create difficulties at layout design and installation. Working fluids in hydraulic and magnetorheological drives transfer energy from sources of pressure to actuating elements. These transformation processes of kinetic / potential energy and the changing their values in response to control signals occur in fluids. Therefore performance and dynamics of drives are determined by dynamics of energy transformation / transfer processes in the working fluids. It is obvious that the dynamics of energy processes in hydraulic and magnetorheological systems depends on physical parameters of working environments and temperature. This calls for increased attention to efficiency of thermal control systems. Existing thermal control systems are unable to meet constantly raised standards; development of drive technologies requires improvement of thermal control systems. The paper considers hybrid thermal control systems for hydraulic and magnetorheological drives. Hybrid thermal control systems apply a combination of thermoelectric semiconductor elements and low power single-stage compressors. This combination has high-performance, significant energy efficiency and small mass / scale. Described numerical model allows conducting a heat calculation of hybrid thermal control systems and determining the dynamics of thermal processes which flow in the working environments. Basic recommendations on the design and rational exploitation for hybrid thermal control systems are given in text.

*Keywords: hydraulic drives, magnetorheological drives, thermal control systems, working fluids, energy processes.*

### References

1. Popov D.N. *Dinamika i regulirovaniye gidro i pnevmosistem* [Dynamics and Regulation of Hydraulic and Pneumatic Systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1976. 424 p.
2. Sveshnikov V.K., Usov A.A. *Stanochnyye gidroprivody* [Machine Tool Hydraulic Drives]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1988. 512 p.
3. Chuprakov Yu. I. *Gidroprivod i sredstva gidroavtomatiki* [Hydraulic Drive and Hydro Automation]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979. 232 p.
4. Smyk A.F. *Fizika. Elektromagnetizm. Kurs lektsiy* [Physics. Electromagnetism. Lectures]. Moscow, 2007. 160 p.



5. Steven R.A., Henry A.S. A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials. *Smart Mater. Struct.*, 2007, vol. 16, no. 1, pp. 43–50. DOI: 10.1088/0964-1726/16/3/R01
6. 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.
7. Naigert K.V. The rotating magnetorheological fluid technologies in actuators of industrial automation systems. *Innovations in modern science*. Neftekamsk, Scientific Publishing Center World of Science; Praha, Publishing house Osvícení, 2017, pp. 102–113.
8. Naigert K.V. The realization principles of new generation magnetorheological systems. *Modern science: current issues and development prospects*. Neftekamsk, Scientific Publishing Center World of Science; Sofia, Publishing house SORoS, 2017, pp. 132–147.
9. 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
10. Kozhushner M.A., Gatin A.K., Grishin M.V. et al. 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
11. Martinez B., Roig A., Obradors X. Magnetic Properties of Gamma-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles Obtained by Vaporization Condensation in a Solar Furnace. *J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 79, pp. 2580–2586. DOI: 10.1063/1.361125
12. Lyubutin I.S., Gervits N.E., Starchikov S.S. et al. Magnetic and Mössbauer Spectroscopy Studies of Hollow Microcapsules Made of Silica-Coated CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles. *Smart Materials and Structures*, 2015, vol. 25, no. 1, pp. 015022. DOI: 10.1088/0964-1726/25/1/015022
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. Dubenko I., Quetz A., Pandey S. et al. 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
15. Naigert K.V., Tutynin V.T. *Reologicheskiiy drossel'-termostat* [The rheological throttle-thermostat]. Patent RF, no. 173746, 2017.
16. Frayshteter G.B., Danilevich S.Y., Rodionova N.V. *Techeniye i teploobmen nen'yutonovskikh zhidkostey v trubakh* [Flow and Heat Transfer of Non-Newtonian Fluids in the Pipes]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1990. 216 p.
17. 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, p. 035002. DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/035002
18. Bibik E.E. *Reologiya dispersnykh system* [Rheology of disperse systems]. Leningrad: Publishing house. Leningr. University, 1981. 172 p.
19. 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
20. Dorfmann A., Ogden R.W. Nonlinear Magnetoelastic Deformations. *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 2004, vol. 57 (4), pp. 599–622. DOI: 10.1093/qjmath/57.4.599
21. 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
22. Gusev V.V., Samoilikov V.K. *Fizicheskiye osnovy proyektirovaniya oborudovaniya* [Physical basis of equipment design]. Moscow, 1999. 141 p.
23. 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
24. 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. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.03.069
25. 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

26. Bulat L.P., Buzin E.V. *Termoelektricheskiye okhlazhdayushchiye ustroystva* [Thermoelectric cooling devices]. St. Petersburg, 2001. 41 p.

27. 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

28. 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

29. 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

30. Korolev V.V., Lomova T.N., Maslennikova A.N. et al. 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

31. Wilkinson W.L. *Nen'yutonovskiye zhidkosti* [Non-Newtonian Fluids]. Moscow, Mir Publ., 1964. 216 p.

32. Taketomi S., Tikadzumi S. *Magnitnyye zhidkosti* [The Magnetic Fluids]. Moscow, Mir Publ., 1993. 272 p.

*Received 30 May 2018*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Найгерг, К.В. Конструктивное исполнение высокоэффективных систем терморегулирования гидравлических и магнитореологических приводов мобильных машин / К.В. Найгерг, В.А. Целищев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 39–48. DOI: 10.14529/engin180305

### FOR CITATION

Naigert K.V., Tselishev V.A. Design of High-Performance Thermal Control Systems of Hydraulic and Magnetorheological Drives for Mobile Machinery. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 39–48. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180305