

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ, ПРИМЕНЯЮЩИЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ И РОТАЦИОННЫЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

*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

Неоспоримым преимуществом магнитореологических опор является адаптивность жесткостных характеристик и возможность их регулирования в реальном времени. Поэтому совершенствование конструкций магнитореологических систем амортизирования и виброгашения, а также их методик моделирования и расчета является актуальным направлением научно-исследовательской деятельности. Необходимо отметить, что магнитореологическим системам присуща нестабильность рабочих параметров, вызванная нагревом магнитореологической рабочей среды в управляющих электромагнитных полях с изменением вязкостных характеристик жидкости носителя. Возможны различные варианты решения данной эксплуатационной проблемы. Во избежание данного негативного фактора требуется осуществление оптимального термостатирования рабочей среды магнитореологических систем. Для стабилизации температурных параметров рационально осуществление динамического управления системой термостатирования и реализация новых конструктивных решений. Представленная система термостатирования имеет оригинальную запатентованную конструкцию реологического дросселя-термостата, содержащего термоэлектрические элементы и позволяющего производить охлаждение рабочей среды на качественно новом уровне. Одним из возможных способов борьбы с нестабильностью рабочих характеристик магнитореологических систем амортизирования и демпфирования является выполнение их комбинированного типа с разделением рабочей камеры на полость, заполненную магнитореологической жидкостью, и полость, заполненную иной демпфирующей средой. Предложенная конструкция адаптивного комбинированного реологического амортизатора оригинальна и запатентована. Изложены основы методологии расчета жесткостных характеристик магнитореологической рабочей полости, конструктивно выполненной составной из субполостей, имеющих индивидуальные управляющие электромагниты и обладающих вариabельными диссипативно-жесткостными свойствами магнитореологической среды, распределенными по длине магнитореологической рабочей полости. Рассмотрены варианты оптимизации распределения диссипативно-жесткостных характеристик для субполостей и их рационального сочетания с целью создания жидкостных систем амортизирования нового поколения. Описанная магнитореологическая система демпфирования и виброгашения содержит магнитодинамический насос оригинальной и запатентованной конструкции, реализующий транспортировку магнитореологической рабочей среды при помощи винтового управляющего электромагнитного поля.

*Ключевые слова:* магнитореологические опоры, дилатантная жидкость, диссипативно-жесткостные свойства, энергоэффективность, адаптивные комбинированные реологические амортизаторы, рессорно-реологическая система.

### Введение

Отличительными чертами разрабатываемых перспективных систем демпфирования и виброгашения являются: быстродействие, точность, износостойкость, энергоэффективность, широкий диапазон нагрузочных, температурных и скоростных условий эксплуатации. Существующие типы амортизаторов во многом не способны обеспечить должную надежность, высокую эффективность и ожидаемую долговечность, поэтому хорошей альтернативой распространенным на сегодняшний день конструкциям могут послужить магнитореологические комбинированные системы демпфирования и виброгашения. Недостаточное развитие уровня техники и технологий, а также отсутствие теоретической базы обуславливают создание магнитореологических систем амортизации комбинированного типа управления без возможности ориентации на аналоги и прототипы,

усложняя процесс их проектирования и расчета. Очевидно, что точность прогнозирования параметров рабочих процессов любых технических систем определяется эффективностью выбранных методов расчета их параметров, идентификацией характеристик расчетных моделей и принятых конструкторских решений [1–12].

**Актуальность**

Постоянно возрастающие требования к эффективности систем демпфирования, к уровню и качеству их рабочих параметров и характеристик, к безопасности и экологичности их рабочих сред вызывают необходимость совершенствовать существующие методы проектирования и расчета, а также создавать новые. Немаловажно обеспечить универсальность разрабатываемых методик, так как элементы магнито-реологических систем амортизации в зависимости от их конструкций требуют различного подхода к моделированию реологических эффектов, возникающих в рабочей среде, находящейся в их рабочих полостях.

**Методика расчета**

Расчетная схема магнито-реологической приводной системы демпфера представлена на рис. 1. Реологический амортизатор имеет комбинацию рабочих полостей: полости, заполненной магнито-реологической жидкостью, и полости, заполненной дилатантной жидкостью. Рабочие полости разделены подвижной перегородкой. Полость, заполненная магнито-реологической жидкостью, содержит субполости, образованные подвижными перегородками, снабженными системой спиральных каналов. Каждая субполость, заполненная магнито-реологической жидкостью, обладает индивидуальным управляющим электромагнитом, выполненным в виде кольцевого индуктора, что позволяет создавать субполости с различными диссипативно-жесткостными свойствами магнито-реологической среды. Полость, заполненная дилатантной жидкостью, выполнена в виде рессорно-реологической системы. Разработанная конструкция реологического амортизатора обладает большей устойчивостью рабочих характеристик за счет наличия комбинации магнито-реологической и дилатантной рабочих полостей, а также рессорно-реологической системы и системы спиральных каналов. Это позволяет гасить импульсные нагрузки посредством изменения диссипативно-жесткостных и реологических свойств магнито-реологической среды, поглощения энергии дилатантной средой и амортизируя рессорно-реологической системой. Система спиральных каналов снижает инерционность рабочей среды в магнито-реологической полости. Вариант конструктивного исполнения демпфера на рис. 2 [13].

В целях стабилизации температурных параметров системы демпфирования производится термостатирование рабочей среды с использованием оригинальной запатентованной конструкции реологического дросселя-термостата [14]. Использование термоэлектрических элементов Пельтье позволяет быстрее и более точно достигать желаемых значений рабочих температур, а отсутствие трансформации управляющего сигнала, подаваемого на термоэлектрические элементы, предоставляет возможность производить охлаждение рабочей среды системы с большей энергоэффективностью, обеспечивая значительное понижение температуры рабочей среды при малой мощности компрессорного оборудования холодильной установки. Реализация импульсного характера управления полупроводниковыми термоэлектрическими элементами значительно увеличивает энергоэффективность системы термостатирования.

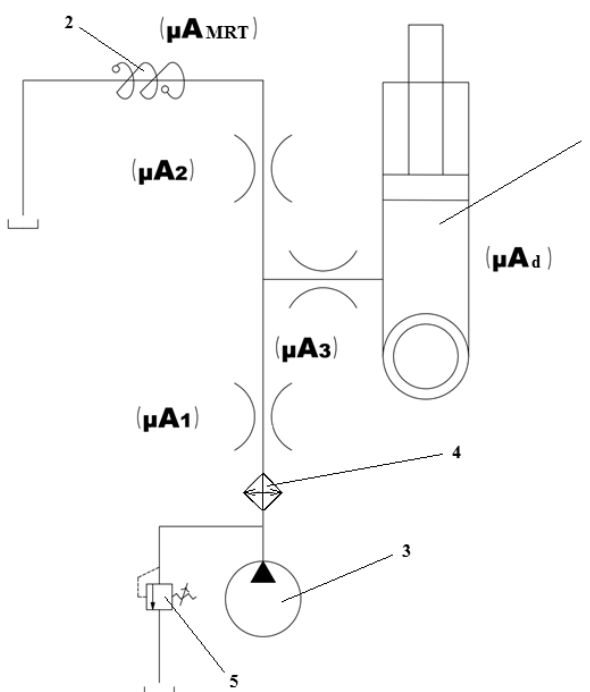


Рис. 1. Магнито-реологическая система демпфирования

## Расчет и конструирование

Допущения:

- температура среды меняется на магнитореологическом дросселе, магнитодинамическом насосе и в магнитореологической камере демпфера, во всех остальных случаях температура рабочей среды остается неизменной;
- трубопроводы заменяются сосредоточенными сопротивлениями;
- массой перегородки между рабочими камерами демпфера можно пренебречь.

Математическая модель демпфирующего элемента формируется на основании базовых уравнений гидромеханики. Уравнение движения демпфера при равномерно распределенных диссипативно-жесткостных свойствах магнитореологической камеры:

$$m \frac{d^2 x_d}{dt^2} + K_1 \frac{dx_d}{dt} + K_2 x = 0,$$

где  $K_1$  – коэффициент демпфирования, который пропорционален вязкости жидкости и площади поршня и обратно пропорционален площади пропускного отверстия,  $K_2$  – коэффициент рессорно-реологической системы.

Уравнение движения поршня комбинированного реологического демпфера при неравномерно распределенных диссипативно-жесткостных свойствах магнитореологической камеры:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + K_1^* \frac{dx(t)}{dt} + K_2 x(t) = F(t),$$

где  $x(t)$  – место положения поршня,  $K_1^*$  – коэффициент демпфирования комбинированной магнитореологической камеры.

Жесткость пружин квазиулевая, поэтому уместно следующее равенство:

$$K_1^* = c_s + c_b,$$

где  $c_s$  – коэффициент демпфирования субкамер:

$$c_s = 8\pi\eta_1^* l_1 + 8\pi\eta_2^* l_2 + 8\pi\eta_3^* l_3 + 8\pi\eta_4^* l_4;$$

$c_b$  – коэффициент демпфирования спиральных каналов в перегородках:

$$c_b = \frac{\left(\frac{8\pi\eta_{1:2}^* h}{Z} \cdot \Delta(D/d)^4\right) + \left(\frac{8\pi\eta_{2:3}^* h}{Z} \cdot \Delta(D/d)^4\right) + \left(\frac{8\pi\eta_{3:4}^* h}{Z} \cdot \Delta(D/d)^4\right)}{n_b},$$

где  $n_b$  – количество перегородок,  $l$  – длина магнитореологической субкамеры,  $\Delta$  – коэффициент гидравлического сопротивления системы спиральных каналов,  $Z$  – количество спиральных каналов,  $m$  – масса перегородки,  $h$  – высота перегородки,  $D$  – диаметр перегородки,  $d$  – диаметр спирального канала,  $\eta_{1:2}^*; \eta_{2:3}^*; \eta_{3:4}^*$  – вязкость в спиральных каналах,  $\eta_1^*; \eta_2^*; \eta_3^*; \eta_4^*$  – вязкость в субкамерах каналов.

Вязкость магнитореологической жидкости в рабочих полостях зависит от параметров магнитного поля и сдвиговых напряжений.

Дилатантная жидкость несжимаема и ее объем постоянен, поэтому рессорно-реологическая система является, по сути, истинной рессорой, коэффициент которой:

$$K_2 x = (n_R c_R + n_C c_C + n_O c_O) x,$$

где  $n_R$  – пропорциональное количество рессор,  $c_R$  – коэффициент жесткости рессоры,  $n_C$  – пропорциональное количество реологических камер,  $c_C$  – коэффициент жесткости реологической камеры,  $n_O$  – пропорциональное количество упругих колец,  $c_O$  – коэффициент жесткости упругих колец.

Систему уравнений балансов расходов рабочей среды в управляющих рабочей камерой линиях целесообразнее представить в выражениях мгновенных массовых расходов.  $G_{e1}$  – мгновенный массовый расход рабочей среды через эквивалентный дроссель с пропускной способностью  $(\mu A)_{e1}$  (линия от насосной установки до слива, включая местное сопротивление на магнитореоло-

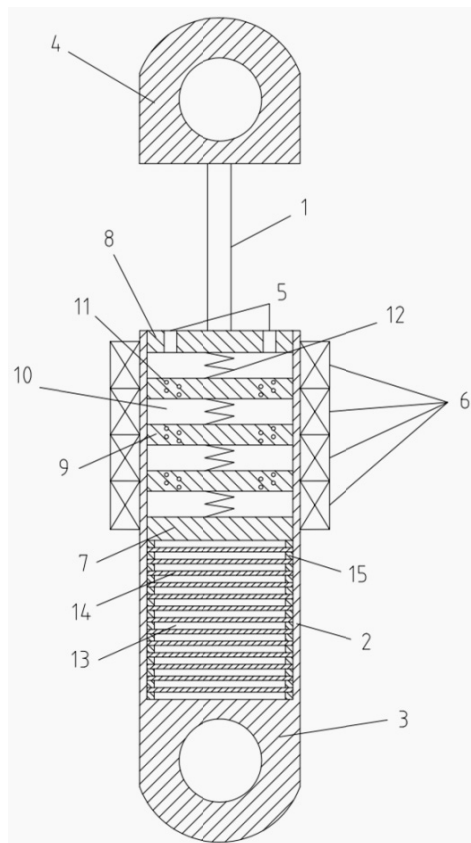


Рис. 2. Магнитореологический демпфер

логическом дросселе);  $G_{e2}$  – мгновенный массовый расход рабочей среды через эквивалентный дроссель с пропускной способностью  $(\mu A)_{e2}$  (управляющая линия от точки разветвления линии до слива, включая местное сопротивление на магнитореологическом дросселе);  $G_{e3}$  – мгновенный массовый расход рабочей среды через эквивалентный дроссель с пропускной способностью  $(\mu A)_{e3}$  (управляющая линия от точки разветвления линии до рабочей камеры демпфера, включая местное сопротивление рабочей камеры).

$$\begin{cases} G_{e1} - G_{e2} - G_{e3} = 0; \\ G_{e2} - G_2 - G_{MRT} = 0; \\ G_{e3} - G_3 - G_d = 0. \end{cases}$$

Пропускную способность магнитореологического дросселя можно определить из выражений:

$$1/(\mu A)_{e1}^2 = 1/(\mu A)_1^2 + 1/(\mu A)_2^2 + 1/(\mu A)_{MRT}^2;$$

$$1/(\mu A)_{e2}^2 = 1/(\mu A)_2^2 + 1/(\mu A)_{MRT}^2;$$

$$1/(\mu A)_{e3}^2 = 1/(\mu A)_3^2 + 1/(\mu A)_d^2.$$

Система привода магнитореологической камеры содержит магнитореологический дроссель и магнитодинамический насос оригинальных запатентованных конструкций. В предложенных конструкциях магнитореологического дросселя и магнитодинамического насоса реализовано комбинированное управление потоком магнитореологической среды. Основы применения комбинированного метода управления потоками магнитореологической жидкости изложены в работах [15–16]. Использование разработанных конструкций магнитореологического дросселя и магнитодинамического насоса существенно расширяет диапазон рабочих температур и давлений магнитореологических систем демпфирования. Магнитореологические и магнитодинамические системы комбинированного типа не имеют выраженной зависимости стабильности расходных характеристик от температуры рабочей среды и позволяют производить моделирование вязкостных характеристик магнитореологической жидкости за счет генерации неньютоновских эффектов. Поэтому применение вращающихся и винтовых управляющих электромагнитных полей в магнитодинамических и магнитореологических устройствах позволяет предупреждать нежелательные утечки рабочей среды через проточную полость устройств при резких скачках давления и расширяет диапазон рабочих давлений для магнитореологической запорно-регулирующей аппаратуры.

При комбинированном управлении потоком магнитореологической среды систему уравнений балансов расходов можно представить в виде [17–24]:

$$\begin{cases} G_{e1} = (\mu A)_{e2} v_{e2} \rho_m + (\mu A)_{e3} v_{e3} \rho_m; \\ G_{e2} = (\mu A)_2 v_2 \rho + (\mu A)_{MRT} v_{MRT} \frac{d\eta}{d\theta}; \\ G_{e3} = (\mu A)_3 v_3 \rho + (\mu A)_d v_d \left( V \frac{dp}{dv} + \frac{d\eta}{d\theta} \right). \end{cases}$$

Для случая комбинированного управления (изменение параметров магнитного поля и сдвигового напряжения):

$$\begin{cases} G_{e1} = (\mu A)_{e2} v_{e2} \rho_m + (\mu A)_{e3} v_{e3} \rho_m; \\ G_{e2} = (\mu A)_2 v_2 \rho + (\mu A)_{MRT} v_{MRT} \frac{d\eta(H, \tau_{sh})}{d\theta(H)}; \\ G_{e3} = (\mu A)_3 v_3 \rho + (\mu A)_d v_d \left( V \frac{dp}{dv} + \frac{d\eta(H, \tau_{sh})}{d\theta(H)} \right). \end{cases}$$

Для случая комбинированного управления (изменение параметров магнитного поля, сдвигового напряжения и температуры):

$$\begin{cases} G_{e1} = (\mu A)_{e2} v_{e2} \rho_m + (\mu A)_{e3} v_{e3} \rho_m; \\ G_{e2} = (\mu A)_2 v_2 \rho + (\mu A)_{MRT} v_{MRT} \frac{d\eta(H, \tau_{sh}, T^0)}{d\theta(H, T^0)}; \\ G_{e3} = (\mu A)_3 v_3 \rho + (\mu A)_d v_d \left( V \frac{dp}{dv} + \frac{d\eta(H, \tau_{sh}, T^0)}{d\theta(H, T^0)} \right), \end{cases}$$

где  $\rho_m$  – среднее значение плотности,  $\tau_{sh}$  – напряжение сдвига.

Расход в управляющей демпфером линии определяется уравнением:

$$Q_{CL} = (\mu A)_{e3} \cdot \frac{dx_d}{dt}.$$

## Расчет и конструирование

Закон изменения значений перемещения демпфирующего механизма имеет выраженную нелинейность силовой характеристики и представляет зависимость перемещения штока  $x$  от давления магнитореологической жидкости в рабочей камере:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x) \frac{dp}{dt}; \\ f(x) = m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + K_1^* \frac{dx(t)}{dt} + K_2 x(t); \\ p = \frac{F}{S_p}, \end{cases}$$

где  $S_p$  – площадь поршня.

Закон изменения реологических характеристик рабочей среды для случая комбинированного управления (изменение параметров магнитного поля и сдвигового напряжения):

$$\frac{d\eta(H, \tau_{sh})}{d\theta(H)} = \frac{d\left(\frac{\tau_{sh}}{\dot{\gamma}} + \eta_p\right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_M(H)}{1 + (\tau_{\tau_s} HM(H))/J}}{d\left(\eta_{sh} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_M(H)}{1 + (\tau_{\tau_s} HM(H))/J}\right) / \rho},$$

где  $J$  – суммарный момент инерции частицы,  $\tau_{\tau_s}$  – времена релаксации (немагнитных и магнитных частиц),  $M$  – намагниченность вещества под действием магнитного поля,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $\eta_{sh}$  – коэффициент сдвиговой вязкости,  $\dot{\gamma}$  – градиент скорости, нормален к направлению движения.

Для случая комбинированного управления (изменение параметров магнитного поля, сдвигового напряжения и температуры):

$$\frac{d\eta(H, \tau_{сдв.}, T^0)}{d\theta(H, T^0)} = \frac{d\left(\frac{\tau_{сдв.}}{\dot{\gamma}} + A^0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT^0}\right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_M(H)}{1 + (\tau_{\tau_s} HM(H))/J}\right)}{d\left(A^0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT^0}\right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau_M(H)}{1 + (\tau_{\tau_s} HM(H))/J}\right) / \rho},$$

где  $A^0$  – const,  $Q$  – энергия активации,  $R$  – газовая постоянная.

Также справедливо:

$$\begin{aligned} V \frac{dp}{dv} + p &= \frac{dm}{dv}, \\ V &= S_p \cdot l_{MRC} \pm \frac{dx}{dt}, \end{aligned}$$

где  $l_{MRC}$  – длина магнитореологической камеры.

Требуемый мгновенный массовый расход магнитодинамического насоса:

$$G_{MRP} = G_{e1}; \quad G_{MRP} = Qg\rho_{MRP}; \quad G_{MRP} = Qg \frac{d\eta}{d\theta}.$$

Расход насоса:

$$Q = S_{MRP} \cdot v.$$

Для описания рабочего процесса адаптивной комбинированной реологической системы амортизации необходимо произвести совместное решение системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x) \frac{dp}{dt}; \\ f(x) = m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + K_1^* \frac{dx(t)}{dt} + K_2 x(t); \\ G_{e1} = (\mu A)_{e2} v_{e2} \rho_m + (\mu A)_{e3} v_{e3} \rho_m; \\ G_{e2} = (\mu A)_2 v_2 \rho + (\mu A)_{MRT} v_{MRT} \frac{d\eta}{d\theta}; \\ G_{e3} = (\mu A)_3 v_3 \rho + (\mu A)_d v_d \left( V \frac{dp}{dv} + \frac{d\eta}{d\theta} \right); \\ G_{e1} = G_{MRP}. \end{cases}$$

### Результаты численного моделирования

В рамках первичных инженерных расчетов оптимизацию рабочего процесса адаптивного комбинированного реологического амортизатора целесообразно производить по  $K_1^*$  (коэффициент демпфирования комбинированной магнитореологической камеры) и  $K_2$  (коэффициент ресорно-реологической камеры). Поэтому рассмотрим варианты оптимизации адаптивного комбинированного реологического амортизатора по соотношению коэффициентов  $K_1^*/K_2$ . Так как адаптивной является именно магнитореологическая камера, рассмотрим вариант оптимизации рабочих характеристик демпфирующей системы при изменении значения  $K_1^*$  (коэффициент демпфирования комбинированной магнитореологической камеры). Изменение значения  $K_1^*$  осу-

ществим за счет изменения вязкости магнитореологической среды во внешних управляющих электромагнитных полях.

В результате численного моделирования динамики адаптивного комбинированного реологического амортизатора в MATLAB получены следующие результаты, показанные на рис. 3–6. Результаты компьютерного моделирования доказывают состоятельность разработанных методов расчета и оптимизации рабочего процесса магнитореологических систем амортизации комбинированного типа. Моделирование значений  $K_1^*$  (коэффициента демпфирования комбинированной магнитореологической камеры) посредством изменения вязкости магнитореологической среды оказывает существенное влияние на время переходных процессов в магнитореологической рабочей камере и динамику процесса. Магнитореологическая рабочая жидкость, находящаяся в рабочей камере демпфера, проявляет выраженные вязкопластичные свойства.

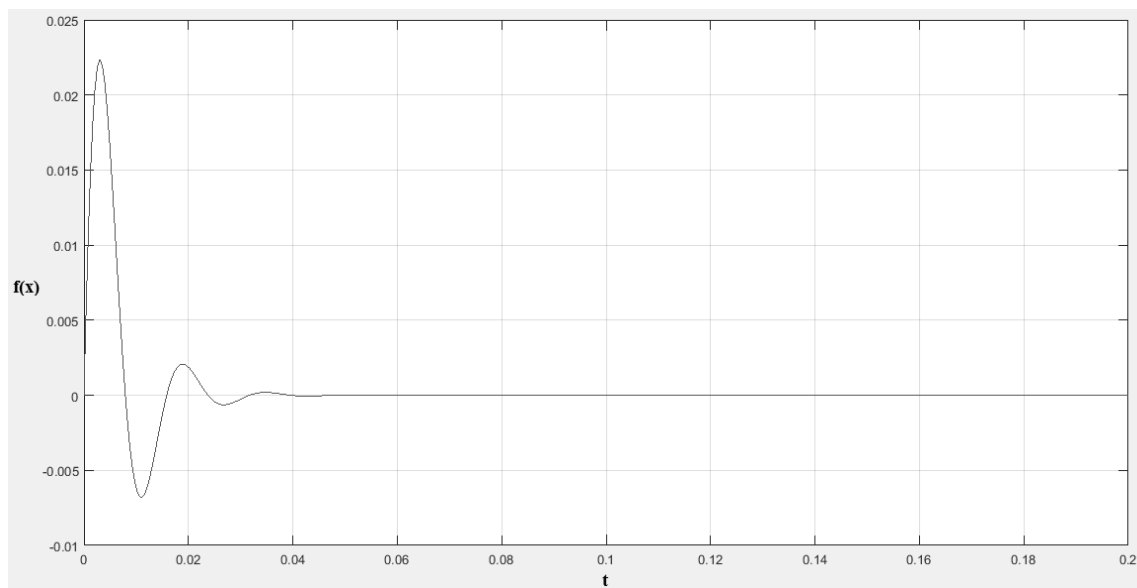


Рис. 3.  $K_1^*/K_2 = 300/12000[(N \cdot s/m)/(N/m)]$ ;  $x (m), t (s)$

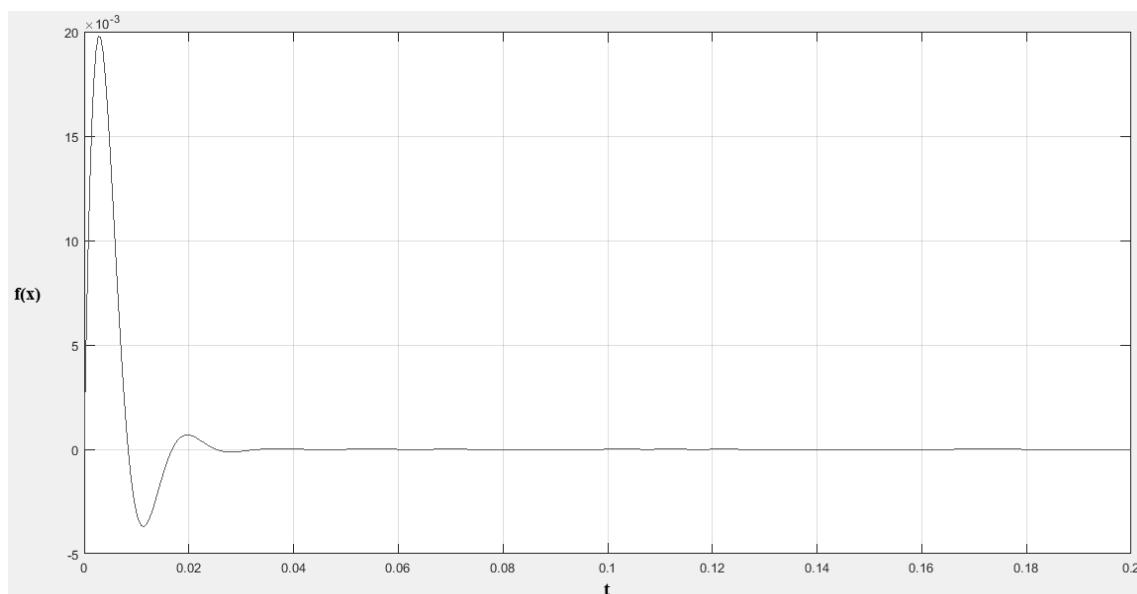


Рис. 4.  $K_1^*/K_2 = 400/12000[(N \cdot s/m)/(N/m)]$ ;  $x \cdot 10^{-3} (m), t (s)$

Полученные значения  $K_1^*$  (коэффициента демпфирования комбинированной магнитореологической камеры) позволяют оптимизировать  $c_S$  (коэффициент демпфирования субкамер) и  $c_B$  (коэффициент демпфирования спиральных каналов в перегородках). Это дает возможность рас-

## Расчет и конструирование

считывать геометрические характеристики рабочих субкамер / спиральных каналов и вязкостные параметры магнитореологической среды в их полостях. Значения  $K_2$  (коэффициента рессорно-реологической камеры) позволяют оптимизировать  $c_R$  (коэффициент жесткости рессор) /  $c_C$  (коэффициент жесткости реологических камер) /  $c_O$  (коэффициент жесткости упругих колец) и определять рациональное количественное сочетание рессор / упругих колец и реологических камер. Вычисленные коэффициенты жесткости элементов рессорно-реологической камеры применимы в расчетах геометрических характеристик рессор / упругих колец / реологических камер и вязкостных характеристик реологических камер, заполненных дилатантной средой.

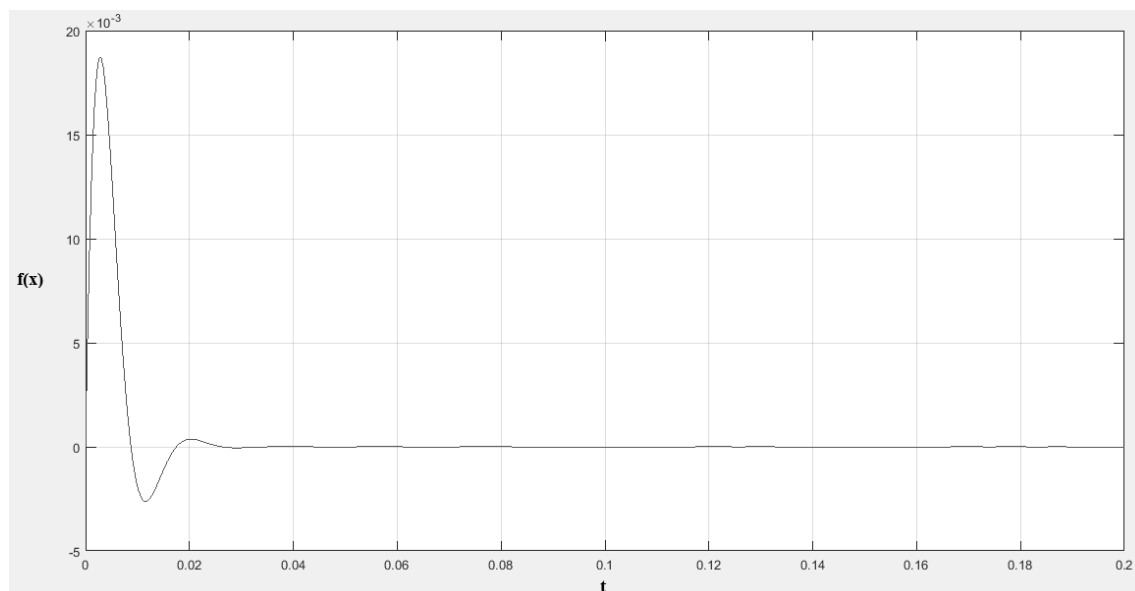


Рис. 5.  $K_1/K_2 = 450/12000[(N \cdot s/m)/(N/m)]$ ;  $x \cdot 10^{-3} (m), t (s)$

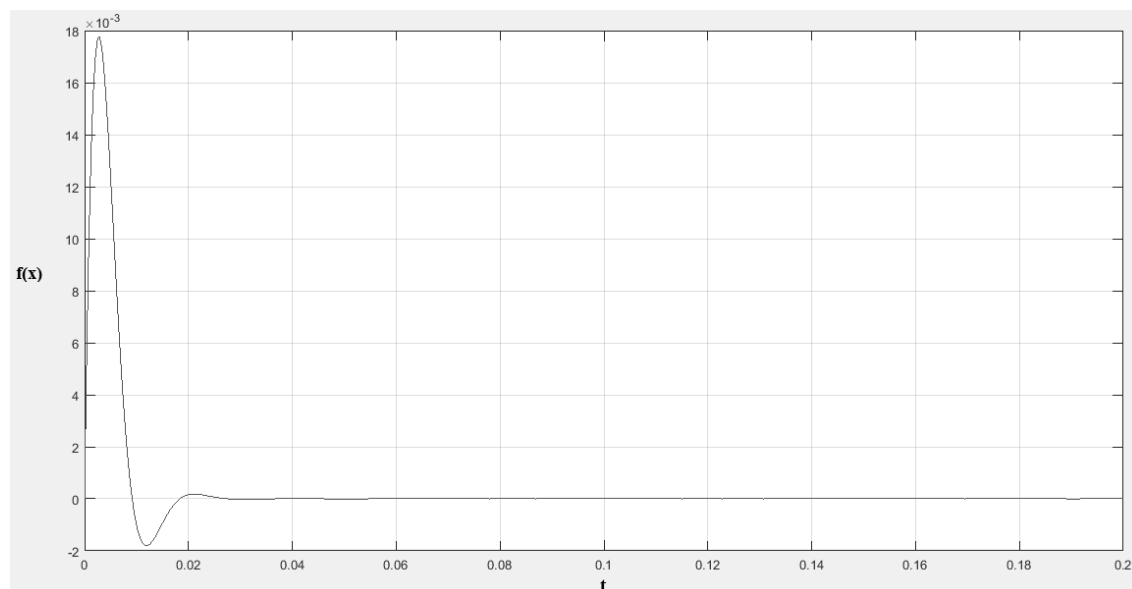


Рис. 6.  $K_1/K_2 = 500/12000[(N \cdot s/m)/(N/m)]$ ;  $x \cdot 10^{-3} (m), t (s)$

### Новизна научно-исследовательской работы

Разработаны методологические основы повышения эффективности процесса проектирования и расчета магнитореологических амортизаторов комбинированного типа, отличающиеся способностью совместной оценки диссипативно-жесткостных и реологических характеристик магнитореологической и рессорно-реологической рабочих камер за счет учета коэффициента демпфирования магнитореологической рабочей камеры с неоднородными диссипативно-жесткостными

характеристиками и коэффициента рессорно-реологической рабочей камеры и позволяющие с использованием компьютерного моделирования прогнозировать параметры магнитореологических систем амортизации комбинированного типа.

Предложен вариант оптимизации рабочего процесса адаптивного комбинированного реологического амортизатора.

Представлены оригинальные запатентованные конструкции адаптивного комбинированного реологического амортизатора, реологического дросселя-термостата, магнитореологического дросселя и магнитодинамического насоса комбинированного типа управления [13–14].

Разработана методика инженерного расчета магнитореологических систем амортизации, отличающаяся от существующих способностью ее применения для моделирования систем амортизации и виброгашения при совместной работе устройств комбинированного типа: магнитореологического амортизатора, магнитореологического дросселя и магнитодинамического насоса.

### Выводы

Предложенная методика позволяет производить инженерные расчеты рабочих параметров систем амортизации и виброгашения при совместной работе магнитореологических и магнитодинамических устройств комбинированного типа.

Рассмотренная магнитореологическая система амортизации и виброгашения, включающая в себя оригинальные магнитореологические и магнитодинамические устройства комбинированного типа, обладает большим диапазоном рабочих температур и давлений и выраженной стабильностью характеристик в сравнении с существующими аналогами.

Время переходных процессов в магнитореологических демпфирующих системах не превышает 200 миллисекунд.

### Литература

1. 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
2. *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
3. *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
4. *Martinez, B. 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
5. *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
6. *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
7. *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
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. Бибик, Е.Е. *Реология дисперсных систем* / Е.Е. Бибик. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 172 с.
10. *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
11. *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



## Расчет и конструирование

12. 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

13. Пат. № 175044 Российская Федерация, МПК F16F 9/53. *Адаптивный комбинированный реологический амортизатор* / К.В. Найгерт, В.Т. Тутьнин. – № 2017130606; заявл. 29.08.2017; опубл. 20.11.2017, Бюл. № 32.

14. Пат. № 173746 Российская Федерация, МПК F16K 13/08. *Реологический дроссель-термостат* / К.В. Найгерт, В.Т. Тутьнин. – № 2017115492; заявл. 02.05.2017; опубл. 07.09.2017, Бюл. № 25.

15. Пат. № 2634163 Российская Федерация, МПК F15B 13/043, F15B 21/06. *Магнито-реологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы золотника* / К.В. Найгерт, С.Н. Редников. – № 2015138981; заявл. 18.08.2014; опубл. 24.10.2017, Бюл. № 30.

16. Пат. № 2634166 Российская Федерация, МПК F15B 13/043, F15B 21/06. *Магнито-реологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы с гидравлическим мостиком* / К.В. Найгерт, С.Н. Редников. – № 2015138981; заявл. 18.08.2014; опубл. 24.10.2017, Бюл. № 30.

17. Гусев, В.В. *Физические основы проектирования оборудования: учеб. пособие* / В.В. Гусев, В.К. Самойликов. – М.: МИЭТ, 1999. – 141 с.

18. 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

19. *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. – Vol. 415. – P. 72–76. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.03.069

20. 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

21. *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

22. *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

23. 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

24. Такетоми, С. *Магнитные жидкости* / С. Такетоми, С. Тикадзуми. – 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.

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

*Поступила в редакцию 23 марта 2018 г.*

## COMBINED AND ROTARY MAGNETORHEOLOGICAL FLUID TECHNOLOGIES IN RHEOLOGICAL DAMPING SYSTEMS

K.V. Naigert<sup>1</sup>, kathy\_naigert@mail.ru,

V.A. Tselischev<sup>2</sup>, 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

An undeniable advantage of magnetorheological supports is adaptability of their stiffness properties and their real-time adjustability. Thus, it is important to research the issues of improving magnetorheological damping systems and developing simulation and calculation methods. It is noteworthy that magnetorheological systems have instable operating parameters due to heating of the magnetorheological environment in electromagnetic control fields, and change in viscosity properties of the carrier fluid. There are various ways to solve this operational problem. To avoid this negative factor, the magnetorheological environment requires an optimal thermostating. To stabilize the temperature parameters, the thermostating system should be dynamically controlled, and new constructive solutions should be implemented. The presented thermostating system has an original patented construction of a rheological thermostatic throttle with thermoelectric elements that greatly improves cooling of the working environment, and makes it possible to faster and accurately obtain the desired operating temperatures. The paper presents a methodology for calculating the stiffness properties of a magnetorheological fluid chamber that includes sub-chambers with individual control electromagnets and variable dissipative-stiffness properties. We considered the ways for optimizing the distribution of dissipative-stiffness properties of sub-chambers, and their rational combination to develop the most advanced damping fluid systems. The described magnetorheological damping system has an original patented magnetodynamic pump that uses helical electromagnetic fields to transport the magnetorheological fluid.

*Keywords:* magnetorheological supports, dilatant fluid, dissipative-stiffness properties, energy efficiency, adaptive combined rheological dampers, rheological spring systems.

### References

1. 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
2. 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
3. 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
4. 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
5. 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, p. 015022. DOI: 10.1088/0964-1726/25/1/015022
6. 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
7. 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
8. 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

9. Bibik E.E. *Reologiya dispersnykh system* [Rheology of disperse systems]. Leningrad: Publishing house. Leningr. University, 1981. 172 p.
10. 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
11. 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
12. 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
13. Naigert K.V., Tutynin V.T. *Adaptivnyy kombinirovannyi reologicheskii amortizator* [The Adaptive Combined Rheological Damper]. Patent RF, no. 175044, 2017.
14. Naigert K.V., Tutynin V.T. *Reologicheskii drossel'-termostat* [The Rheological Throttle-Thermostat]. Patent RF, no. 173746, 2017.
15. Naigert K.V., Rednikov S.N. *Magnitoreologicheskii privod pryamogo elektromagnitnogo upravleniya kharakteristikami potoka verkhnego kontura gidravlicheskoy sistemy zolotnika* [The magnetorheological Drive for Directly Electromagnetically Controlling Flow Characteristics of an Upper Contour of a Hydraulic Slide-Valve System]. Patent RF, no. 2634163, 2017.
16. Naigert K.V., Rednikov S.N. *Magnitoreologicheskii privod pryamogo elektromagnitnogo upravleniya kharakteristikami potoka verkhnego kontura gidravlicheskoy sistemy s gidravlicheskim mostikom* [The Magnetorheological Drive for Directly Electromagnetically Controlling Flow Characteristics of an Upper Contour of a Hydraulic System Which Includes a Hydraulic Bridge]. Patent RF, no. 2634166, 2017.
17. Gusev V.V., Samoilikov V.K. *Fizicheskiye osnovy proyektirovaniya oborudovaniya* [Physical Basis of Equipment Design]. Moscow, 1999. 141 p.
18. 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
19. 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, vol. 415, pp. 72–76. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.03.069
20. 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
21. 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. p. 35–39. DOI: 10.1088/0964-1726/16/5/N02
22. 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
23. 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
24. Taketomi S., Tikadzumi S. *Magnitnyye zhidkosti* [The Magnetic Fluids]. Moscow: Mir Publ., 1993. 272 p.

*Received 23 March 2018*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Найгерт, К.В. Реологические системы демпфирования, применяющие комбинированные и ротационные магнитореологические технологии / К.В. Найгерт, В.А. Целищев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 26–36. DOI: 10.14529/engin190103

### FOR CITATION

Naigert K.V., Tselishev V.A. Combined and Rotary Magnetorheological Fluid Technologies in Rheological Damping Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 26–36. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin190103