

УДК 621.318.3

DOI 10.46960/2658-6754\_2022\_1\_16

## РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА УПРАВЛЯЕМОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ ГИДРООПОРЫ

**А.И. Ермолаев**

Институт проблем машиностроения Российской академии наук  
Нижний Новгород, Россия  
acidwolfvx@rambler.ru

Выполнены расчет и оптимизация электромагнита магнитореологического трансформатора управляемой виброзащитной гидравлической опоры ОГМ-95 с двумя цилиндрическими каналами посредством программ мультифизического конечно-элементного моделирования. Необходимость проведения повторного расчета электромагнита магнитореологического трансформатора гидроопоры обусловлена изменением технических требований к нему и переходом на питание постоянным током. Актуальность исследования также состоит в повышении интереса к данному типу виброзащитных устройств, поиске новых путей их совершенствования, в том числе, с использованием новых возможностей компьютерных программ. Приведен краткий алгоритм настройки параметров конечно-элементной модели, основные требования к электромагниту магнитореологического трансформатора, используемые при вычислениях математические выражения для определения магнитного поля с учетом намагничивания магнитореологической жидкости и стального сердечника. При оптимизации электромагнита использовались две целевые функции: сумма потребляемой мощности и электромагнитной постоянной времени и интегральная функция квадрата разности действительного и требуемого значений индукции магнитного поля в гидравлическом канале. Сравнение новых результатов расчета с параметрами гидроопоры ОГМ-95 показало, что новый электромагнит потребляет в 6 раз меньше энергии при номинальном токе, имеет в 3 раза меньшую плотность тока, при этом обеспечивает почти такую же плотность магнитного потока в гидравлическом канале.

**Ключевые слова:** гидроопора, магнитореологический трансформатор, метод конечных элементов, моделирование, оптимизация, целевая функция, электромагнит.

**Для цитирования:** Ермолаев, А.И. Расчет и оптимизация электромагнита магнитореологического трансформатора управляемой виброзащитной гидроопоры // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 1. С. 16-26.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_1\_16

# CALCULATION AND OPTIMIZATION OF MAGNETORHEOLOGICAL TRANSFORMER ELECTROMAGNET OF SEMIACTIVE HYDROMOUNT

**A.I. Ermolaev**

Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of a Science  
Nizhny Novgorod, Russia  
acidwolfvx@rambler.ru

**Abstract.** The purpose of the article is to perform the calculation and optimization of the electromagnet of the magnetorheological transformer of a semiactive hydraulic mount OGM-95 with two cylindrical channels by means of a multiphysical finite element modeling (FEM) modeling. The need to re-calculate the electromagnet of the magnetorheological transformer of the hydraulic mount was due to a change in the technical requirements for it and the transition to DC power. The relevance of the research also consists in increasing interest in this type of vibration protection devices, in finding for new approaches to improve them, including using the new possibilities of computer technology. The article presents a brief algorithm for tuning the finite element model, the basic requirements for the magnetorheological transformer electromagnet, mathematical expressions used in calculations to determine the magnetic field taking into account the magnetization of the magnetorheological fluid and the steel core. When optimizing the electromagnet, two objective functions were used: the sum of the power consumption and the electromagnetic time constant and the integral function of the squared difference between the actual and desirable values of the magnetic flux density in the hydraulic channel. A comparison of the new calculation results with the parameters of the OGM-95 hydraulic mount showed that the new electromagnet consumes 6 times less energy at rated current, has 3 times less current density, while providing almost the same magnetic field density in the hydraulic channel.

**Keywords:** electromagnet, finite element method, hydraulic mount, magnetorheological transformer, optimization, objective function, simulation.

**For citation:** A.I. Ermolaev, "Calculation and optimization of magnetorheological transformer electromagnet of semiactive hydromount", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 16-26, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_1\_16

## I. Введение

В последнее время наиболее прогрессивным направлением в области разработки новых виброзащитных средств является класс устройств т.н. управляемой или полупассивной виброзащиты [1-2]. Управляемые виброзащитные устройства сочетают в себе достоинства как пассивных виброизоляторов, так и активных виброгасителей [3]. Принцип работы управляемых виброзащитных устройств основан на своевременном изменении физиче-

ских свойств их чувствительных элементов посредством внешнего источника энергии и алгоритма управления, что обеспечивает повышение качества виброгашения по сравнению с пассивными гасителями. Вместе с тем, энергопотребление таких устройств в 10-100 раз меньше, чем у активных виброгасителей, потребляемая мощность которых по определению должна быть больше мощности основной гармоники вибрации.

К средствам управляемой виброзащиты относятся, в частности, магнитореологические демпферы. Принцип их действия основан на использовании магнитовязкого (магнитореологического) эффекта, заключающегося в способности материалов изменять свою вязкость (предел текучести) в зависимости от магнитного поля [1-4]. Важнейшим элементом электромагнитной и магнитореологической подсистем гидроопоры является магнитореологический трансформатор (МРТ), состоящий из возбуждающего электромагнита (ВЭ) и гидравлических каналов с магнитореологической жидкостью (МРЖ). Расчет этого элемента предполагает выбор конфигурации МРТ, определение его основных геометрических размеров, а также параметров электромагнитной катушки. МРТ при этом должен обеспечить требуемую силу демпфирования, магнитное поле в канале, быстродействие и динамический диапазон.

Цель данной статьи – описать процесс расчета и оптимизации электромагнита МРТ с двумя цилиндрическими каналами на примере магнитореологической гидроопоры (МРГО) ОГМ-95 с применением программных средств мультифизического конечно-элементного моделирования, а также сравнить полученные в ходе вычислений параметры нового МРТ с существующим. Описанный в статье подход может быть применен для расчета МРТ другой конфигурации, например, для поршневых МРГО с кольцевыми каналами, в любых программных средах конечно-элементного моделирования. Разработанная компьютерная модель позволяет очень быстро пересчитать МРТ при других технических требованиях и провести автоматическую оптимизацию ВЭ.

## **II. Требования к магнитореологическому трансформатору**

Расчет МРТ проводился для МРГО модели ОГМ-95, разработанной НИЛ «Управляемая виброзащита электромеханических комплексов». Конфигурация МРТ такой опоры приведена на рис. 1. Геометрия МРТ рассматриваемой МРГО была воспроизведена в редакторе среды мультифизического проектирования в составе расчетной модели. Геометрия модели МРТ и ее расчетная сетка приведены на рис. 2.

На основании этих исходных данных геометрические размеры и электротехнические параметры ВЭ МРТ были подобраны таким образом, чтобы МРТ удовлетворял техническим требованиям [5]:

1. достаточное быстродействие ( $T < 0,05$  с);
2. незначительное энергопотребление ( $P < 20$  Вт);
3. ток не должен перегревать катушку ВЭ ( $4I / \pi d^2 \leq 5$  А/мм<sup>2</sup>) [6, 7];
4. магнитное поле в канале с МРЖ должно достигать насыщения при максимальном токе ( $B \geq 0,3$  Тл для *MRF-122EG*).

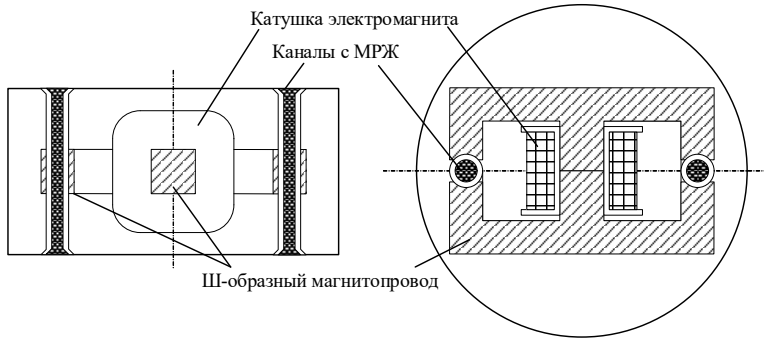
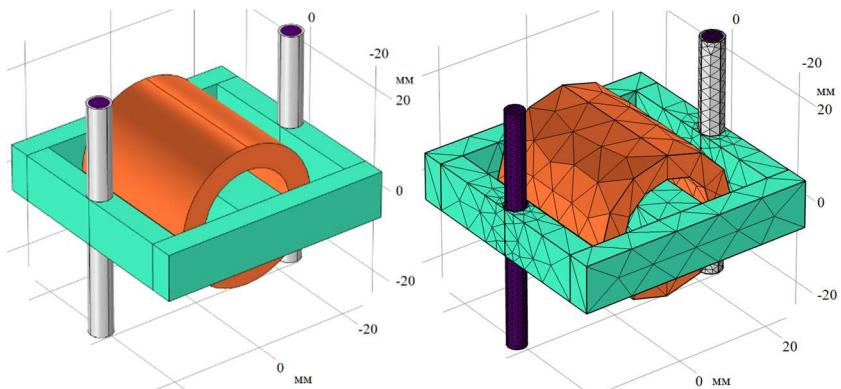


Рис. 1. Магнитоологический трансформатор опоры ОГМ-95

Fig. 1. Magnetorheological transformer of OGM-95 mount



(а)

(б)

Рис. 2. Модель МРТ:  
геометрия (а); расчетная сетка (б)

Fig. 2. Model of MRT:  
geometry (а); mesh (б)

### III. Расчет магнитогеологического трансформатора

Первый этап настройки модели предполагает задание электромагнитных свойств материалов для различных ее компонентов: магнитной  $\mu$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , удельной электропроводности  $\sigma$  и интерполированной кривой намагничивания  $B(H)$ . Последующий расчет магнитного поля в каждой точке расчетной области модели осуществляется с использованием уравнений в частных производных [8, 9]:

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j} \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{j} &= \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_e\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\nabla$  – оператор набла,  $\mathbf{H}$  – вектор напряженности магнитного поля,  $\mathbf{j}$  – вектор плотности электрического тока,  $\mathbf{B}$  – вектор индукции магнитного поля,  $\mathbf{A}$  – векторный потенциал,  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля,  $\mathbf{j}_e$  – вектор плотности индуцированного тока.

Первое уравнение системы (1) представляет собой формализацию теоремы о циркуляции магнитного поля, второе – закон Гаусса, а третье – закон Ома в дифференциальной форме [9]. Катушка ВЭ рассчитывается как однородный многовитковый проводник кольцевой формы. Помимо удельной электропроводности и геометрических размеров, для катушки МРТ определяются исходные данные: ток  $I$ , диаметр провода  $d$  и число витков  $N$ . Расчет катушки ВЭ является наиболее ответственным этапом разработки МРТ, поскольку ее параметры определяют быстродействие, энергопотребление и допустимый ток [1, 10].

Быстродействие катушки ВЭ оценивалось через величину электромагнитной постоянной времени катушки  $T_{эм}$ , определяемой из соотношения [11]:

$$T_{эм} = \frac{L}{R} = \frac{5,653}{204,98} = 0,0276 \text{ с}, \quad (2)$$

где  $L$  – индуктивность электромагнита,  $R$  – сопротивление обмотки.

Параметры  $L$  и  $R$  моделируемого МРТ были автоматически определены исходя из геометрических размеров ВЭ и параметров материалов. В случае питания катушки постоянным током энергопотребление ВЭ МРТ определяется известным выражением [11]:

$$P = IR^2 = I \left( 8N \frac{r_{сп} \rho}{d^2} \right) = 2,95 \text{ Вт}, \quad (3)$$

где  $r_{\text{ср}} = 12,5$  мм – радиус средней линии обмотки катушки,  $\rho = 0,017$  Ом·мм<sup>2</sup>/м – удельное сопротивление материала обмотки,  $I = 0,12$  А,  $d = 0,2$  мм,  $N = 5000$ .

Как следует из (2) и (3), с ростом сопротивления  $R$  уменьшается постоянная времени  $T_{\text{ЭМ}}$  и увеличивается потребляемая мощность  $P$ . Таким образом, конструкция МРТ может быть дополнительно оптимизирована в пользу повышения быстродействия, либо уменьшения энергопотребления.

Наконец, ток  $I$ , протекающий через катушку ВЭ, не должен перегревать ее при непрерывной работе. Для этого должно выполняться условие  $4I / \pi d^2 \leq 5$  А/мм<sup>2</sup> [6, 7]. Для обмотки ВЭ плотность тока будет равна:

$$\frac{I}{S} = \frac{4I}{\pi d^2} = 3,82 \text{ А/мм}^2. \quad (4)$$

Поскольку  $3,82 \leq 5,00$ , условие по нагреву обмотки ВЭ МРТ выполняется. Данное условие справедливо для проводов и обмоток с естественным охлаждением, работающих в непрерывном режиме [7].

Вектор плотности индуцированного в катушке тока определялся из следующего соотношения [12]:

$$\mathbf{j}_e = \frac{NI}{A} \mathbf{e}, \quad (5)$$

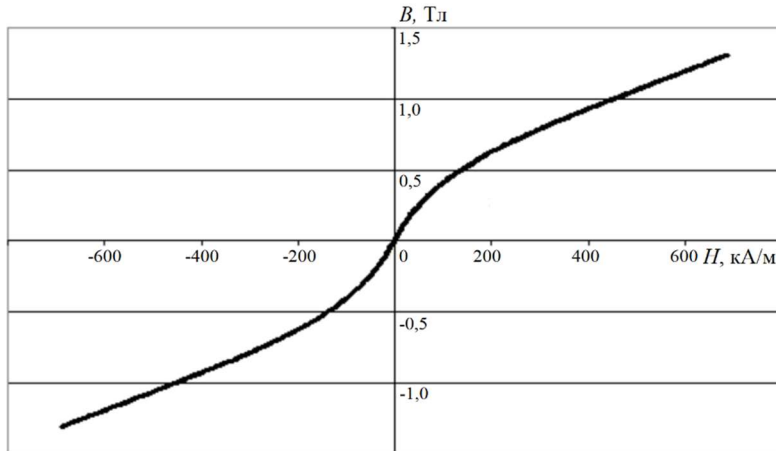
где  $N$  – число витков катушки,  $I$  – сила тока,  $A$  – площадь продольного сечения обмотки катушки,  $\mathbf{e}$  – вектор направлений тока в катушке.

Расчет значений магнитной индукции в магнитопроводе и МРЖ осуществлялся методом конечных элементов с предварительным этапом анализа геометрии катушки электромагнита, необходимым для определения направления тока. Для МРЖ и магнитопровода, где магнитное поле достигает насыщения при малых значениях напряженности  $\mathbf{H}$ , магнитная индукция рассчитывалась по формуле [13]:

$$\mathbf{B} = f(\|\mathbf{H}\|) \frac{\mathbf{H}}{\|\mathbf{H}\|}, \quad (6)$$

где  $\|\mathbf{H}\|$  – вектор напряженности магнитного поля,  $\mathbf{H}$  – вектор напряженностей согласно кривой намагничивания материала. Для МРЖ типа *MRF-122EG* эта кривая приведена на рис. 3 [14].

Для обмотки катушки и других немагнитных материалов, учитываемых в модели, действует классический закон намагничивания  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ , где  $\mu_0$  – магнитная постоянная [13].

Рис. 3. Кривая намагничивания *MRF-122EG*Fig. 3. Magnetization curve of *MRF-122EG*

#### IV. Оптимизация магнитоэлектрического трансформатора

Приведенные в предыдущем разделе значения были получены в результате совместного расчета модели и задачи оптимизации МРТ. Как было показано ранее, оптимизация проводилась с целью повышения определенных показателей производительности или эффективности МРТ при поддержании остальных на требуемом уровне. Так, приоритетными показателями выступили быстродействие и потребляемая мощность, зависящие от  $R$ . Целевая функция в этом случае является линейной:

$$S_1 = \frac{L}{R} + w \cdot I^2 \cdot R \rightarrow \min_{\{R\}}, \quad (7)$$

где  $w = 0,001$  с/Вт – весовой коэффициент (определяется экспериментально).

Для решения задачи оптимизации были заданы граничные условия:

$$\begin{cases} T = \frac{L}{R} \leq 0,05 \text{ с} \\ P = R \cdot I^2 \leq 20 \text{ Вт} \end{cases}, \quad (8)$$

а также условие по нагреву ( $4I / \pi d^2 \leq 5$  А/мм<sup>2</sup>). Варьируемыми параметрами являлись питающий ток  $I$ , число витков катушки  $N$  и диаметр провода  $d$ ,

причем последние параметры связаны между собой через геометрию модели ( $Nd^2 = \text{const}$ ). Из (7) следует, что минимизация целевой функции достигается при  $I = 0$  А. Во избежание получения решения задачи оптимизации при нулевом токе в модель была добавлена интегральная целевая функция, минимизация которой достигается путем уменьшения погрешности магнитного поля  $B$  в гидравлическом канале с МРЖ относительно заданного значения  $B_0 = 0,35$  Тл методом наименьших квадратов. Обе задачи минимизации решаются совместно. Сама целевая функция при этом имеет вид:

$$S_2 = \int_0^{i_0} (B - B_0)^2 dl \rightarrow \min. \quad (9)$$

Целевая функция  $S_2$  необходима при проектировании МРТ для того, чтобы при расчетных значениях параметров ВЭ магнитное поле в каналах с МРЖ было равно заданному. Распределение магнитного поля в МРТ представлено на рис. 4.

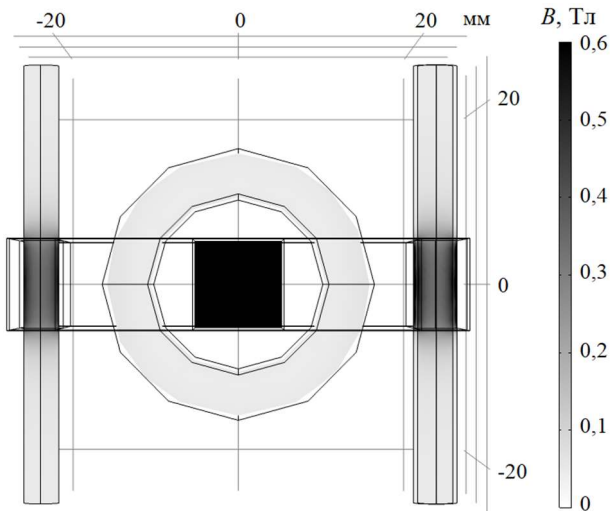


Рис. 4. График магнитного поля в МРТ

Fig. 4. Magnetic field density in the MRT

После нескольких итераций процесса оптимизации были получены окончательные значения искоемых параметров МРТ. Эти и связанные с ними параметры приведены в табл. 1.



Таблица 1.  
 Параметры магнито-реологического трансформатора

Table 1.  
 Parameters of magnetorheological transformer

Параметр	Обозначение	ОГМ-95	Новый МРТ	Ед. изм.
Радиус средней линии катушки	$r_{\text{ср}}$	0,0125	0,0125	м
Число витков	$N$	4850	5000	витков
Диаметр обмотки	$d$	0,00014	0,0002	м
Толщина катушки	$h_{\text{к}}$	0,0032	0,005	м
Диаметр канала	$t_d$	0,004	0,004	м
Сопротивление катушки	$R$	420,00	204,98	Ом
Индуктивность ВЭ	$L$	1,05	5,6526	Гн
Сила тока	$I$	0,2	0,120	А
Потребляемая мощность	$W$	17,0	2,9517	Вт
Постоянная времени	$T_{\text{ЭМ}}$	0,0025	0,0276	с
Магнитная индукция в канале с МРЖ	$B \approx B_0$	0,5	0,350	Тл

## V. Заключение

Разработанная мультифизическая конечно-элементная модель МРТ позволила исследовать протекающие в нем электромагнитные процессы и рассчитать его электротехнические параметры. Проведенная оптимизация параметров ВЭ МРТ позволила добиться существенного снижения энергопотребления  $P$  (с 17,00 до 2,95 Вт) за счет уменьшения питающего тока  $I$  (с 0,20 до 0,12 А) и сопротивления  $R$  (с 420 до 205 Ом). Магнитная индукция  $B$  в канале с МРЖ при этом снизилась незначительно (с 0,50 до 0,35 Тл). Установлено, что у существующей конструкции МРГО модели ОГМ-95, использующей электромагнит переменного тока, не выполнялось условие по нагреву (4) при номинальном токе ( $4I / \pi d^2 = 4 \cdot 0,2 / \pi \cdot 0,14^2 \approx 13 \geq 5 \text{ А/мм}^2$ ). Уменьшение плотности тока и потребляемой мощности было достигнуто за счет увеличения диаметра провода, что, однако, привело к существенному снижению быстродействия МРТ (с 2,5 до 27,6 мс). Вместе с тем, такое быстродействие является достаточным для виброгасителя, работающего в условиях биений и переменных частот вибровозмущений.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00372).*

© Ермолаев А.И., 2022

Поступила в редакцию 01.03.2022

Received 01.03.2022

**Библиографический список**

- [1] Wang D.H., Liao W.H. Magnetorheological fluid dampers a review of parametric modeling // *Smart Materials and Structures*. 2011. Vol. 20. No. 2. 023001. DOI: 10.1088/0964-1726/20/2/023001
- [2] Xia Z., Wang X., Hou J., Wei S., Fang Y. Non-linear dynamic analysis of double-layer semi-active vibration isolation systems using revised Bingham model // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2016. Vol. 35. No. 1. Pp. 17–24. DOI: 10.1177/0263092316628715
- [3] Yuan X., Tian T., Ling H., Qiu T., He H. A review on structural development of magnetorheological fluid damper // *Shock and Vibration*. 2019. Vol. 2019. ID 1498962. DOI: 10.1155/2019/1498962
- [4] Krauze P. Comparison of control strategies in a semi-active suspension system of the experimental ATV // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2013. Vol. 32. Pp. 67–80. DOI: 10.1260/0263-0923.32.1-2.67
- [5] Ebrahimi B. Development of hybrid electromagnetic dampers for vehicle suspension systems: PhD Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2009. – 192 p.
- [6] Белоруссов Н.И., Бачелис Д.С., Саакян А.Е. Электрические кабели, провода и шнуры. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 704 с.
- [7] Токовые нагрузки на кабели и провода [Электронный ресурс] // Кабель.РФ. URL: <https://cable.ru/articles/id-62.php> (Дата обращения: 15.12.2020).
- [8] Баландин М.Ю., Шурина Э.П. Векторный метод конечных элементов. Новосибирск: НГТУ, 2001. – 69 с.
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. Т. II. Теория поля. 8-е изд. М.: Физматлит, 2003. – 536 с.
- [10] Yang G., Spencer Jr. B.F., Carlson J.D., Sain M.K. Large-scale MR fluid dampers modeling, and dynamic performance considerations // *Engineering Structures*. 2002. Vol. 24. No. 3. Pp. 309–323. DOI: 10.1016/S0141-0296(01)00097-9
- [11] Nguyen Q.-H., Han Y.-M., Choi S.-B., Wereley N.M. Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method // *Smart Materials and Structures*. 2007. Vol. 16. No. 6. Pp. 2242–2252. DOI: 10.1088/0964-1726/16/6/027
- [12] Woan G. *The Cambridge Handbook of Physics Formulas*. Cambridge University Press, 2000. – 220 p. DOI: 10.1017/CBO9780511755828
- [13] Калашников Э.Г., Электричество. 4е изд. М.: Наука, 1977. – 591 с.
- [14] Lordmrstore. Products: [Электронный ресурс] // LORD Corp. URL: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products>. (Дата обращения: 10.02.2022).

**References**

- [1] D.H. Wang and W.H. Liao, “Magnetorheological fluid dampers a review of parametric modeling”, *Smart Materials and Structures*, vol. 20, no. 2, 023001, Jan. 2011. DOI: 10.1088/0964-1726/20/2/023001
- [2] Z. Xia, X. Wang, J. Hou, S. Wei and Y. Fang, “Non-linear dynamic analysis of double-layer semi-active vibration isolation systems using revised Bingham model”,

- Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 35, no. 1, pp. 17–24, March 2016. DOI: 10.1177/0263092316628715
- [3] X. Yuan, T. Tian, H. Ling, T. Qiu and H. He, “A review on structural development of magnetorheological fluid damper”, *Shock and Vibration*, vol. 2019, 1498962, Apr. 2019. DOI: 10.1155/2019/1498962
- [4] P. Krauze, “Comparison of control strategies in a semi-active suspension system of the experimental ATV”, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 32, pp. 67–80, March 2013. DOI: 10.1260/0263-0923.32.1-2.67
- [5] B. Ebrahimi, “Development of hybrid electromagnetic dampers for vehicle suspension systems”, PhD Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2009.
- [6] N.I. Belorussov, D.S. Bachelis and A.E. Saakyan, *Elektricheskie kabeli, provoda i shnury* [*Electrical cables, wires and cords*]. Moscow: Book on Demand, 2013 (in Russian).
- [7] Tokovye nagruzki na kabeli i provoda [Current loads on cables and wires]. [Online]. Available at: <https://cable.ru/articles/id-62.php> [Accessed: Dec. 15, 2020] (in Russian).
- [8] M.U. Balandin and E.P. Shurina. *Vektornyj metod konechnyh elementov* [*Vector Finite Element Method*]. Novosibirsk: NGTU, 2001 (in Russian).
- [9] L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Teoreticheskaya fizika. Vol. II. Teoriya polya* [*Theoretical Physics. Vol. II. Field Theory*]. 8th ed. Moscow: Fizmatlit, 2003 (in Russian).
- [10] G. Yang, B.F. Spencer Jr., J.D. Carlson, M.K. Sain, “Large-scale MR fluid dampers modeling, and dynamic performance considerations”, *Engineering Structures*, vol. 24, no. 3, pp. 309–323, March 2002. DOI: 10.1016/S0141-0296(01)00097-9
- [11] Q.-H. Nguyen, Y.-M. Han, S.-B. Choi and N.M. Wereley, “Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method”, *Smart Materials and Structures*, vol. 16, no. 6, pp. 2242–2252, Oct. 2007. DOI: 10.1088/0964-1726/16/6/027
- [12] G. Woan, *The Cambridge Handbook of Physics Formulas*. Cambridge University Press. 2000, 220 p. DOI: 10.1017/CBO9780511755828
- [13] E.G. Kalashnikov, *Electrichestvo* [*Electricity*]. 4th ed. Moscow: Nauka, 1977 (in Russian).
- [14] Lordmrstore. Products. LORD Corp. [Online]. Available at: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products>. [Accessed: Feb. 10, 2022].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Ермолаев Артем Игоревич**, кандидат технических наук, научный сотрудник Института проблем машиностроения Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Artem I. Ermolaev**, Cand. Sci. (Eng.), researcher of the Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation