

УДК. 621.752.3

Оценка амплитудно-частотных характеристик электромеханического преобразователя с учетом гистерезисных эффектов в его ферромагнитных сердечниках

Б.А. Гордеев¹, А.Н. Осмехин¹, С.Н. Охулков¹, В.Г. Титов²

¹ФГБУН «Институт проблем машиностроения Российской Академии наук»,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

²ГОУВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

E-mail: gord349@mail.ru, newnuclear@mail.ru, oxulkovs@mail.ru, eos@nntu.nnov.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В нелинейных механических системах возможно существование нескольких положений равновесия, автоколебательных режимов, явлений синхронизации и захватывания частоты при переходных режимах работы электромоторов, что может приводить к разрушению силовых агрегатов. В связи с этим в настоящее время актуальной является задача разработки гидроопор с электромеханическим преобразователем, требующая рассмотрения влияния гистерезисных эффектов в ферромагнитных сердечниках на амплитудно-частотные характеристики электромеханического преобразователя.

Материалы и методы: Расчеты частотных сдвигов динамических амплитудно-частотных характеристик гидроопоры с электромеханическим преобразователем с учетом фазовых сдвигов, обусловленных гистерезисом в ферромагнитных сердечниках возбуждающих электромагнитов, выполнены на основе уравнений гидродинамики, теорий четырехполюсников, электромагнитного поля и методов расчета электромагнитных систем.

Результаты: Проведена оценка виртуальных частотных сдвигов динамических амплитудно-частотных характеристик гидроопоры с электромеханическим преобразователем при смене полярности внешнего магнитного поля с учетом гистерезиса в ферромагнитных сердечниках возбуждающих электромагнитов. Приведены зависимости амплитудно-частотных характеристик динамической жесткости гидравлической виброопоры в интервале температур рабочей магнитной жидкости от 20 до 80°C для всех частот вибросигналов, а также зависимости амплитуд коэффициента передачи от фазовых сдвигов, обусловленных гистерезисом в ферромагнитных сердечниках при температуре магнитной жидкости 20 °C для всех частот возбуждения гидроопоры с электромеханическим преобразователем.

Выводы: Установлено отрицательное действие гистерезиса в ферромагнитных сердечниках возбуждающих электромагнитов на работу гидроопоры с электромеханическим преобразователем. Построенные по экстремумам передаточных функций амплитуды коэффициента передачи гидроопоры с электромеханическим преобразователем в зависимости от фазовых сдвигов, обусловленных гистерезисом в ферромагнитных сердечниках, показали, что возбуждение дроссельных каналов в электромеханических преобразователях происходит не синхронно с фазой вибросигнала. Полученные результаты применимы в разработках адаптивных электромеханических преобразователей гидравлических виброопор.

Ключевые слова: магнитная индукция, электромеханический преобразователь, магнитное поле, магнитная жидкость, скорость релаксации, амплитудно-частотные характеристики.

Amplitude-frequency characteristics of electromechanical converters depending on hysteresis effects in their ferromagnetic cores

B.A. Gordeev¹, A.N. Osmekhin¹, S.N. Okhulkov¹, V.G. Titov²

¹Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russian Federation

²Nizhny Novgorod State Technical University of R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation
E-mail: gord349@mail.ru, newnuclear@mail.ru, oxulkovs@mail.ru, eos@nntu.nnov.ru

Abstract

Background: When electric motors operate in transient modes, the non-linear mechanical systems can have several equilibrium positions, self-oscillating modes, synchronization and frequency locking phenomena which can lead to power unit destruction. Therefore, it is currently urgent to develop hydraulic mountings with electromechanical converters and, consequently, to study the influence of hysteresis effects in ferromagnetic cores on the amplitude-frequency characteristics of electromechanical converters.

Materials and methods: The frequency shifts of amplitude-frequency characteristics of hydraulic mountings with electromechanical converters taking into account hysteresis in ferromagnetic cores of exciting electromagnets are calculated on the basis of hydrodynamics, theories of two-port networks, electromagnetic field and methods of calculation of electromagnetic systems.

Results: We have determined virtual frequency shifts of amplitude-frequency characteristics of hydraulic mountings with electromechanical converters in case of changing external magnetic field polarity, taking into account hysteresis in ferromagnetic cores of exciting electromagnets. The paper describes dependences of dynamic rigidity amplitude-frequency characteristics of a hydraulic vibratory bearing for excitation frequencies at the temperatures of the working magnetic fluid of 20–80°C. It also shows the dependences of the transfer function extrema on the magnetic fluid temperature and

phase shifts caused by hysteresis in ferromagnetic cores for excitation frequencies of a hydraulic vibratory bearing with an electromagnetic converter OG-90.

Conclusions: The plotted extrema of transfer functions, depending on the imaginary frequency shifts caused by hysteresis in cores of exciting electromagnets, show that excitement of throttle channels of electromechanical converters does not occur simultaneously with the vibration signal phase. The hysteresis in ferromagnetic cores of exciting electromagnets has a negative effect on the work of a hydraulic mounting with an electromechanical converter.

Key words: magnetic induction; electromechanical converter; magnetic field; magnetic fluid; relaxation speed; amplitude-frequency characteristics.

Остаточная магнитная индукция (гистерезисные эффекты) ферромагнитных сердечников возбуждающих электромагнитов (ВЭ) электро-механических преобразователей (ЭМП) недопустима, так как она увеличивает время переходных процессов при смене полярности внешнего магнитного поля [1–6]. В результате возникает задержка между напряженностью магнитного поля H и его магнитной индукцией B . Фазовый сдвиг между функциями H и B обусловлен в основном гистерезисом сердечников ВЭ. Кроме этого, на задержку между функциями H и B оказывает влияние и скорость релаксации рабочей магнитной жидкости (МЖ) [4, 5, 9].

Возникающие фазовые сдвиги между напряженностью H и индукцией B оказывают отрицательное влияние на работу гидроопоры с ЭМП. Поэтому их необходимо устранять при настройке гидроопоры с ЭМП на заданные резонансные частоты [1–6].

При разработке активных гидроопор с ЭМП их конструкция изменяется путем введения новых управляющих элементов – ферромагнитных сердечников ВЭ [1–5, 8]. В этом случае возникают следующие задачи:

1) проведение оценки виртуального частотного сдвига динамических амплитудно-частотных характеристик гидроопоры с ЭМП при смене полярности внешнего магнитного поля с учетом гистерезиса в сердечниках ВЭ и скорости релаксации МЖ;

2) построение динамических амплитудно-частотных характеристик гидроопоры с ЭМП.

3) построение зависимости амплитуд коэффициентов передачи гидроопоры с ЭМП от фазовых сдвигов, обусловленных гистерезисом сердечников ВЭ, для частот возбуждения.

Рассмотрим три случая для остаточной магнитной индукции сердечников ВЭ, которые обуславливают фазовые сдвиги между периодическими функциями $H = H_m \sin \omega t$ и $B = B_r \sin(\omega t - \varphi)$ в 10, 20 и 30 %:

$$\text{а) } \Delta\varphi_3 = 0,1 \cdot 2\pi (\text{рад}) = 36^\circ$$

при фазовом сдвиге между H и B 10 %;

$$\text{б) } \Delta\varphi_3 = 0,2 \cdot 2\pi (\text{рад}) = 72^\circ$$

при фазовом сдвиге между H и B 20 %;

$$\text{в) } \Delta\varphi_3 = 0,3 \cdot 2\pi (\text{рад}) = 108^\circ$$

при фазовом сдвиге между H и B 30 %.

Определим временной сдвиг между периодическими функциями H и B для сигнала возбуждения с частотой $f_B = 8$ Гц при периоде

повторения сигнала возбуждения на резонансной частоте вибросигнала $T_n = 0,125$ с:

$$\text{а) } t_1 = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} T_n = \frac{0,1 \cdot \pi}{2\pi} 0,125 = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\text{б) } t_2 = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} T_n = \frac{0,2 \cdot \pi}{2\pi} 0,125 = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\text{в) } t_3 = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} T_n = \frac{0,3 \cdot \pi}{2\pi} 0,125 = 18,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Далее перейдем к расчету мнимых частотных сдвигов, которые обусловлены этими временными задержками функций H и B .

Известно, что фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ между периодическими функциями круговых частот ω_1 и ω_2 определяется уравнением [10]

$$\Delta\varphi = (\omega_1 - \omega_2)t = \omega_1 \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где Δt – временной сдвиг между периодическими функциями H и B электромагнитного поля ВЭ.

Из выражения (1) находим Δt и ω_2 :

$$\Delta t = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{\omega_1} t; \quad (2)$$

$$\omega_2 = \omega_1 - \frac{\omega_1 \Delta t}{t}. \quad (3)$$

Круговая частота ω_2 является мнимой круговой частотой электромагнитного поля ВЭ. Электромагнитным полем ВЭ возбуждаются дроссельные каналы гидроопоры с ЭМП. Мнимая круговая частота ω_2 электромагнитного поля ВЭ не совпадает с действительной круговой частотой ω_1 входного вибросигнала.

В выражении (3) второй член правой части $-\omega_1 \cdot \Delta t / t$ является отрицательным мнимым (виртуальным) частотным сдвигом магнитного поля (мнимый вычит из действительной круговой частоты ω_1 вибросигнала) [10]. Виртуальный частотный сдвиг магнитного поля обусловлен временной задержкой сигнала возбуждения ВЭ от гистерезиса их ферромагнитных сердечников [1–6].

Затем перейдем от круговых частот ω к циклическим частотам f , поделив обе части выражения (3) на 2π :

$$f_2 = f_1 - f_1 \frac{\Delta t}{t}. \quad (4)$$

В выражении (4) отношение временного сдвига Δt магнитного поля и текущего времени t в правой части является безразмерным коэффициентом $n = \Delta t / t$. Выражение для цикли-

ческой мнимой частоты f_2 магнитного поля ВЭ представляется в виде [10]

$$f_2 = f_1 - n f_1, \quad (5)$$

где $-n f_1 = \Delta f$ – отрицательный частотный сдвиг (вычет из действительной частоты f_1 вибросигнала).

Проведем расчет мнимых частот f_2 с отрицательными мнимыми вычетами Δf для амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) гидроопоры с ЭМП для указанных выше фазовых сдвигов между магнитной индукцией B магнитного поля и частотой входного вибросигнала – возбуждением ЭМП:

$$а) f_{2,1} = f_1 - \frac{f_1 \cdot \Delta t_1}{t} = 8 - 8 \cdot 6,25 \cdot 10^{-3} = 7,95 \text{ Гц};$$

$$б) f_{2,2} = f_1 - \frac{f_1 \cdot \Delta t_2}{t} = 8 - 8 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} = 7,9 \text{ Гц};$$

$$в) f_{2,2} = f_1 - \frac{f_1 \cdot \Delta t_3}{t} = 8 - 8 \cdot 18,75 \cdot 10^{-3} = 7,85 \text{ Гц}.$$

По аналогичной методике проводится расчет для остальных мнимых частот f_{2i} и отрицательных мнимых вычетов Δf_i , обусловленных гистерезисом сердечников ВЭ, для всего частотного диапазона работы гидроопоры с ЭМП. Результаты расчета приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Расчет мнимых частот f_2 электромагнитного поля ВЭ в дроссельных каналах МРТ

i	$f_{1,i}$, Гц	$f_{2,i}$, Гц		
		10 %-й сдвиг	20 %-й сдвиг	30 %-й сдвиг
0	8	7,95	7,9	7,85
1	25	25,15	24,7	24,53
2	50	49,7	49,37	49,06
3	75	74,53	74,06	73,6
4	100	99,37	98,87	98,12
5	125	124,21	123,43	122,65
6	150	149,06	148,12	147,18
7	175	173,90	172,81	171,71
8	200	198,15	197,5	196,25
9	225	223,59	222,18	220,78

Передаточная функция получена при решении совместной системы механических и гидравлических уравнений, и она совпадает с видом передаточной функции, полученной операционным методом с использованием преобразования Лапласа. Такая функция при замене комплексной частоты $j\omega$ комплексной величиной s имеет вид отношения двух полиномов второго порядка с постоянными коэффициентами [2, 3, 8]:

$$W(s)_i = \frac{Y(s)_i}{X(s)_i} = \frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_{0i}}{a_2 s^2 + a_1 s + a_{0i}}. \quad (6)$$

По частотной передаточной функции вида (6) построены АЧХ динамической жесткости гидроопоры с ЭМП в зависимости от температуры МЖ в диапазоне от 20 до 80°C (рис. 1).

Таблица 2. Расчет отрицательных мнимых (виртуальных) вычетов частот Δf , обусловленных гистерезисом сердечников ВЭ

i	$f_{1,i}$, Гц	Δf_{10i} , Гц 10%-й сдвиг	Δf_{20i} , Гц 20%-й сдвиг	Δf_{30i} , Гц 30%-й сдвиг
0	8	0,05	0,1	0,15
1	25	0,15	0,3	0,47
2	50	0,3	0,625	0,937
3	75	0,468	0,937	1,4
4	100	0,625	1,125	1,875
5	125	0,781	1,5625	2,347
6	150	0,937	1,875	2,8125
7	175	1,093	2,1875	3,281
8	200	1,25	2,5	3,75
9	225	1,406	2,8125	4,218

Установлено, что динамическая вязкость МЖ при работе ЭМП гидропор изменяется вследствие своего нагрева, что влечет изменение гидравлического коэффициента трения МЖ в дроссельных каналах ЭМП с ростом температуры [1, 7].

В результате гидравлический коэффициент трения МЖ является переменным для частот возбуждения ЭМП. На рис. 2 представлена характерная зависимость динамической вязкости МЖ гидропоры (на основе глицерина) в диапазоне температур от 20 до 80°C [1, 7].

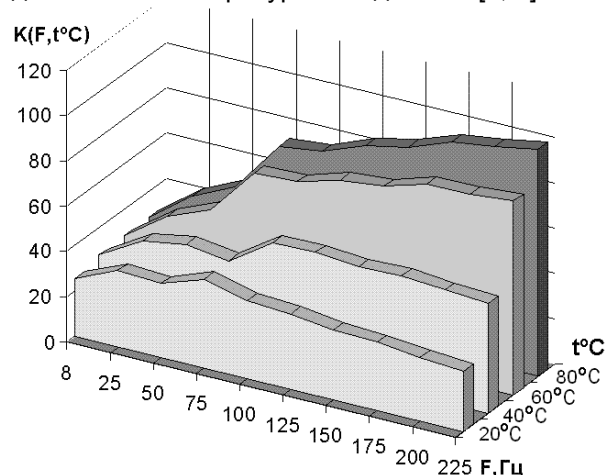


Рис. 1. Зависимости АЧХ динамической жесткости гидропоры с ЭМП ОГ-90 от температуры рабочей жидкости и частоты возбуждения

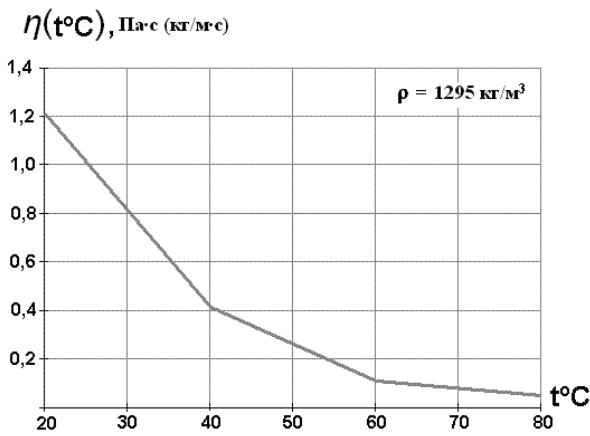


Рис. 2. Характерная зависимость динамической вязкости рабочей МЖ гидропоры на основе глицерина от температуры

Анализ полученных зависимостей (рис. 1) показывает, что для настройки гидропоры с ЭМП на заданные частоты необходимо принимать меры по принудительному охлаждению рабочей МЖ.

Также по экстремумам частотной передаточной функции $W(s)$ вида (6) определены максимальные амплитуды коэффициентов передачи для всех частот возбуждения гидропоры с ЭМП в диапазоне температур от 20 до 80°C.

На рис. 3 представлены зависимости амплитуд коэффициента передачи гидропоры с ЭМП ОГ-90 от фазовых сдвигов, обусловленных гистерезисом сердечников ВЭ, для всех частот возбуждения ЭМП при температуре рабочей магнитной жидкости 20 °С [7].

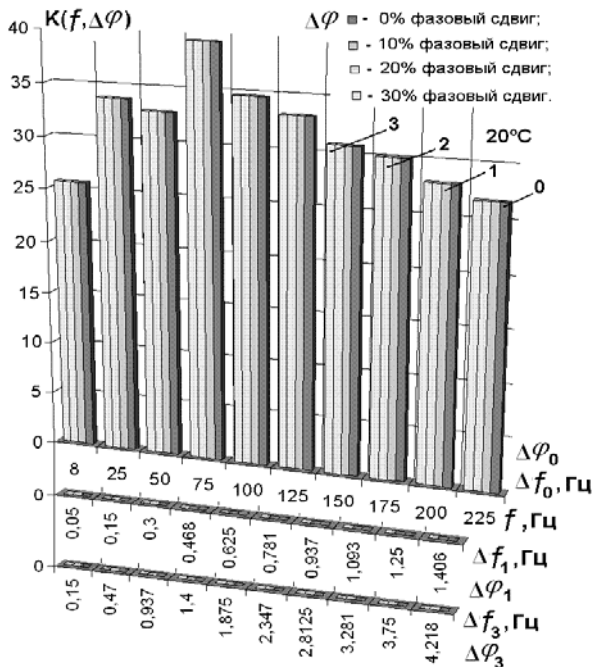


Рис. 3. Зависимости амплитуд коэффициентов передачи гидропоры с ЭМП ОГ-90 (на рисунке 0, 1, 2, 3) от фазовых сдвигов, обусловленных гистерезисом сердечников ВЭ, для всех частот возбуждения ЭМП при температуре рабочей магнитной жидкости 20°C

Заключение

Анализ зависимостей максимальных амплитуд коэффициентов передачи (АЧХ) от мнимых частотных сдвигов, обусловленных гистерезисом ферромагнитных сердечников ВЭ, показывает, что гистерезис в сердечниках ВЭ оказывает отрицательное действие на работу гидропоры с ЭМП – возбуждение дроссельных каналов в ЭМП происходит не синхронно с фазой вибросигнала.

Список литературы

1. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев, В.И. Ерофеев, А.В. Синева, О.О. Мугин. – М.: Физматлит, 2004. – 175 с.
2. Физические основы и конструкция индукционного магнитореологического трансформатора гидропор / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.Н. Осмехин, В.П. Горсков // Прикладная механика и технология машиностроения. – Н. Новгород, 2011. – №2 (19). – С. 52–68
3. Оптимальное управление магнитореологическими трансформаторами гидропор в системах виброзащиты / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.Н. Осмехин, В.П. Горсков // Прикладная механика и технология машиностроения. – Н. Новгород, 2011. – №2 (19). – С. 31–42.
4. Экспериментальное исследование реологических свойств магнитных жидкостей в зависимости от величины напряженности внешнего магнитного поля / Б.А. Гордеев, В.В. Бугайский, С.Н. Охулков, А.Н. Осмехин // Прикладная механика и технология машиностроения. – Н. Новгород, 2011. – №2(19). – С. 43–51.
5. Динамика протекания магнитореологической жидкости в дроссельных каналах при действии магнитных полей / Б.А. Гордеев, В.И. Ерофеев, С.Н. Охулков, А.В. Синева // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2007. – № 2. – С. 95–99.
6. Переходные процессы в магнитореологических заполнителях гидропор при ударных нагрузках / Б.А. Гордеев, С.А. Булгакова, С.Ф. Тумаков, С.Н. Охулков // VIII Всерос. науч. конф. «Нелинейные колебания механических систем». – Н. Новгород, Т. 2. – 2008. – С. 85–90.
7. Гордеев Б.А., Осмехин А.Н., Охулков С.Н. Зависимость динамических характеристик гидравлических демпферов от температуры рабочей жидкости // X Всерос. совещание-семинар «Инженерно-физические проблемы новой техники». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 174–176.
8. Охулков С.Н. Разработка метода расчета и конструкции магнитореологических трансформаторов гидропор: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. – Нижний Новгород, 2011. – С. 1–21.
9. Шульман З.П., Кордонский В.И. Магнитореологический эффект. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
10. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Высш. шк., 1978. – 232 с.
11. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений: учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 320 с.
12. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1964. – 847 с.

References

1. Gordeev, B.A., Erofeev, V.I., Sinev, A.V., Mugin, O.O. *Sistemy vibrozashchity s ispol'zovaniem inertsiionnosti i dissipatsii reologicheskikh sred* [Vibration protection systems using time lag and dissipation of rheological mediums]. Moscow, Fizmatlit, 2004. 175 p.
2. Gordeev, B.A., Okhulkov, S.N., Osmekhin, A.N., Gorskov, V.P. *Fizicheskie osnovy i konstruktziya induktsionnogo magnitореологического трансформатора gidroopor*

[Physical foundations and design of hydraulic mountings inductive magnetorheological transformer]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnologiya mashinostroeniya*, 2011, no. 2(19), pp. 52–68.

3. Gordeev, B.A., Okhulkov, S.N., Osmekhin, A.N., Gorskov, V.P. Optimal'noe upravlenie magnitoreologicheskimi transformatorami gidroopor v sistemakh vibrozashchity [Optimal control hydraulic mounting of magnetorheological transformers in vibration protection systems]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnologiya mashinostroeniya*, 2011, no. 2(19), pp. 31–42.

4. Gordeev, B.A., Bugayskiy, V.V., Okhulkov, S.N., Osmekhin, A.N. Eksperimental'noe issledovanie reologicheskikh svoystv magnitnykh zhidkostey v zavisimosti ot velichiny napryazhennosti vneshnego magnitnogo polya [Experimental study of rheological properties of magnetic fluids depending upon external magnetic field strength value]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnologiya mashinostroeniya*, 2011, no. 2(19), pp. 43–51.

5. Gordeev, B.A., Erofeev, V.I., Okhulkov, S.N., Sinev, A.V. Dinamika protekaniya magnitoreologicheskoy zhidkosti v drossel'nykh kanalakh pri deystvii magnitnykh poley [Dynamics of magnetic fluid flowing in throttle channels under magnetic fields]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2007, no. 2, pp. 95–99.

6. Gordeev, B.A., Bulgakova, S.A., Tumakov, S.F., Okhulkov, S.N. Perekhodnye protsessy v magnitoreologicheskikh zapolnitelyakh gidroopor pri udarnykh nagruzkakh [Transient processes in hydraulic mounting magnetorheological fillers under impact loads]. *VIII Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya «Nelineynye kolebaniya mekhanicheskikh sistem»*

[The VIII-th All-Russian scientific conference «Nonlinear oscillations of mechanical systems»]. 2008, vol. 2, pp. 85–90.

7. Gordeev, B.A., Osmekhin, A.N., Okhulkov, S.N. Zavisimost' dinamicheskikh kharakteristik gidravlicheskikh dempferov ot temperatury rabochey zhidkosti [Dependence of dynamic parameters of hydraulic dampers on the working fluid temperature]. *X Vserossiyskoe soveshchanie-seminar «Inzhenerno-fizicheskie problemy novoy tekhniki»* [The X-th All-Russian conference-seminar «Engineering and physical problems of modern machines»]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2012, pp. 174–176.

8. Okhulkov, S.N. *Razrabotka metoda rascheta i konstruktivnykh magnitoreologicheskikh transformatorov gidroopor*. Avtoref. diss. kand. fiz.-mat. nauk [Development of calculation method and design of magnetorheological transformers of hydraulic mountings. Abstract of diss. cand. phys.-math. sci.]. Nizhny Novgorod, 2011, pp. 1–21.

9. Shul'man, Z.P., Kordonskiy, V.I. *Magnitoreologicheskiiy effect* [Magnetorheological effect]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1982. 184 p.

10. Bessonov, L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole* [Electrical engineering theory. Electromagnetic field]. Moscow, Vysshaya shkola, 1978. 232 p.

11. Spektor, S.A. *Elektricheskie izmereniya fizicheskikh velichin: Metody izmereniy* [Electrical measurements of physical values: measurement techniques]. Leningrad, Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1987. 320 p.

12. Yavorskiy, B.M., Dettlaf, A.A. *Spravochnik po fizike* [A physics reference book]. Moscow, Nauka, 1964. 847 p.

Гордеев Борис Александрович,

ФГБУН «Институт проблем машиностроения Российской Академии наук»,
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией виброзащиты машин,
телефон (831) 432-23-56,
e-mail: gord349@mail.ru

Осмехин Александр Николаевич,

ФГБУН «Институт проблем машиностроения Российской Академии наук»,
аспирант,
телефон (831) 297-94-87,
e-mail: newnuclear@mail.ru

Охулков Сергей Николаевич,

ФГБУН «Институт проблем машиностроения Российской Академии наук»,
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории виброзащиты машин,
телефон (831) 297-57-08,
e-mail: oxulkovs@mail.ru

Титов Владимир Георгиевич,

ГОУВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электрооборудования судов,
телефон (831) 436-17-68,
e-mail: eos@nntu.nnov.ru