

УДК. 621.752.3

Устранение гистерезисных эффектов в ферромагнитных сердечниках электромеханических преобразователей гидравлических виброопор

Б.А. Гордеев¹, А.Н. Осмехин¹, С.Н. Охулков¹, А.С. Плехов²

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

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

E-mail: gord349@mail.ru, newnuclear@mail.ru, oxulkovs@mail.ru, aplehov@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Вопросы, связанные с разработкой нетрадиционных средств гашения вибрации и шума энергоёмких энергетических установок, являются актуальными. Они тем более актуальны, что за рубежом, в частности Германии и США, уже несколько лет ведутся работы по созданию адаптивных средств гашения вибраций, основанных на взаимодействии магнитных полей с движущимися магнито-реологическими компонентами гидравлических виброопор. В настоящее время перспективным направлением является разработка гидроопор с электромеханическим преобразователем в целях устранения гистерезисных эффектов в ферромагнитных сердечниках, влияющих на его амплитудно-частотные характеристики.

Материалы и методы: Расчеты мощности импульсов размагничивания на частоте размагничивания и импульсных токов для размагничивания сердечников электромеханического преобразователя гидроопоры и размагничивания магнито-реологической жидкости выполнены на основе теории электромагнитного поля и методов расчета электромагнитных систем.

Результаты: Предложен способ ликвидации гистерезисных эффектов в электромеханических преобразователях гидроопор посредством суммарного сигнала возбуждения и размагничивания ферромагнитных сердечников возбуждающих электромагнитов, сформированного из отдельных импульсных сигналов. Проведены расчеты мощности импульсов размагничивания на частоте размагничивания и расчеты импульсных токов для размагничивания сердечников возбуждающих электромагнитов и релаксации магнито-реологической жидкости в электромеханическом преобразователе.

Выводы: Предложенный способ устранения гистерезисных эффектов в электромеханических преобразователях позволяет ликвидировать фазовые сдвиги между амплитудно-частотной характеристикой и возбуждением самого электромеханического преобразователя гидроопоры переменным магнитным полем. Тем самым устраняется негативное влияние гистерезисных эффектов в электромеханическом преобразователе гидроопоры на её амплитудно-частотную характеристику. Полученные результаты применимы в разработках адаптивных электромеханических преобразователей гидроопор.

Ключевые слова: магнитная индукция, электромеханический преобразователь, магнитная жидкость, ферромагнитные сердечники, возбуждающие электромагниты, фазовые сдвиги, скорость релаксации.

Elimination of hysteresis effects in ferromagnetic cores of hydraulic vibratory bearing electromechanical converters

B.A. Gordeev¹, A.N. Osmekhin¹, S.N. Okhulkov¹, A.S. Plehov²

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, aplehov@mail.ru

Abstract

Background: It is now urgent to develop alternative means of absorbing vibration and noise of power-intensive power installations, especially in view of the fact that foreign countries, Germany and the USA in particular, have been working on developing adaptive means of vibration absorption based on interaction of magnetic fields with moving magnetorheological components of hydraulic vibration bearings. A promising research direction now is developing hydraulic mountings with an electromechanical converter in order to eliminate hysteresis effects in ferromagnetic cores affecting the amplitude-frequency characteristics.

Materials and methods: The power of degaussing impulses at a degaussing frequency, the pulse currents for degaussing the cores of the hydraulic mounting magnetorheological transformer and relaxation of magnetorheological fluid are calculated on the basis of the electromagnetic field theory and methods of electromagnetic system calculation.

Results: The paper describes a technique of eliminating hysteresis effects in the magnetorheological transformers of hydraulic mountings by using the total excitation signal and by degaussing ferromagnetic cores of the exciting electromagnets formed by separate pulse signals. It also presents calculations of degaussing impulse power at the degaussing frequency and the pulse currents for exciting electromagnet core degaussing and magnetic fluid relaxation in hydraulic mountings.

Conclusions: It is possible to eliminate the phase shifts between the amplitude-frequency characteristics of hydraulic mountings with electromechanical converters and excitation of the electromechanical converter itself with the variable magnetic field by using the total excitation signal and degaussing.

Key words: magnetic induction, magnetorheological transformer, magnetic fluid, ferromagnetic cores, exciting electromagnets, phase shifts, relaxation speed.

При разработке активных гидропор с электромеханическими преобразователями (ЭМП) конструкция гидропор изменяется путем введения управляющих элементов – ферромагнитных сердечников возбуждающих электромагнитов (ВЭ) [1–5]. В этом случае необходимо ликвидировать остаточную магнитную индукцию сердечников ВЭ и аномальную магнитную вязкость магнитоэологической жидкости (МЖ) в дроссельных каналах ЭМП.

При размагничивании сердечников ВЭ на их поверхностный скин-слой воздействуют магнитным полем с частотой размагничивая, например, $f_p = 200$ Гц. При размагничивающем импульсном переменном магнитном поле домены в сердечниках ВЭ не будут успевать выстраиваться из-за быстрой смены полярности переменного магнитного поля и будут находиться в хаотичном порядке, тем самым ликвидируется остаточная магнитная индукция, обусловленная гистерезисом сердечников ВЭ. Импульсное переменное магнитное поле в дроссельных каналах ЭМП препятствует их открыванию. Этому будет препятствовать созданное магнитным полем с частотой $f_p = 200$ Гц сильное магнитное давление, которое намного больше гидравлического давления от действия инерционной нагрузки [1–3].

Уменьшение магнитной вязкости МЖ в дроссельных каналах гидропоры с ЭМП не повлечет их открывания, так как импульсное переменное магнитное поле с частотой $f_{pмж} = 3,0 \cdot 10^3$ Гц будет создавать также сильное магнитное давление, которое намного больше гидравлического давления, созданного от действия инерционной нагрузки [1–3].

Ликвидировать фазовые сдвиги между амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) динамической жесткости гидропоры с ЭМП и возбуждением самого ЭМП и добиться синхронного закрывания и открывания дроссельных каналов переменным магнитным полем с частотой вибросигнала можно за счет возбуждения и предварительного размагничивания сердечников ЭМП и МЖ. Этого можно достичь с помощью сформированного суммарного сигнала возбуждения и размагничивания, состоящего из отдельных электромагнитных импульсных сигналов, в блоке возбуждения ЭМП (рис. 1, а, б) с частотами возбуждения $2f_c$, размагничивания ферромагнитных сердечников f_{p1} и размагничивания МЖ f_{p2} [2, 3, 8].

Необходимо указать на то, что в сформированном суммарном сигнале возбуждения и размагничивания импульсный сигнал раз-

магничивания МЖ выбирается с частотой, например, $f_{p2} = 3000$ Гц (рис. 1, б).

При размагничивании сердечников ВЭ и релаксации МЖ действующие в ВЭ токи являются импульсными ($I_{э,имп}$). Поэтому, создавая импульсное переменное магнитное поле с B до 2,0 Тл, импульсные токи определены через мощность в импульсе размагничивания.

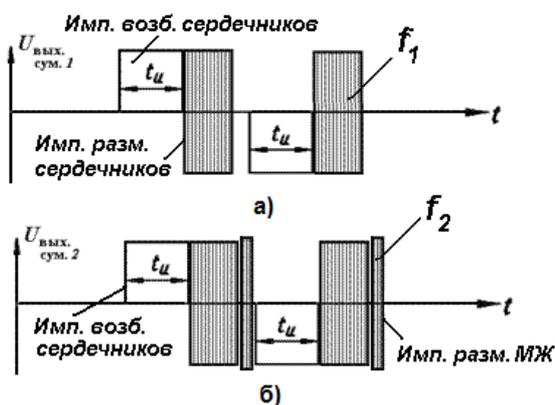


Рис. 1. Импульсные сигналы магнитных полей: а – сигналы возбуждения и размагничивания f_{p1} ферромагнитных сердечников ЭМП; б – сигналы возбуждения и размагничивания f_{p1} и сигнал размагничивания МЖ f_{p2}

Мощность импульса размагничивания на частоте размагничивания f_p определяется по формуле [10]

$$P_{p,и} = \frac{U_{p,и}^2}{Z_{э}} \tau_{p,и} f_p, \quad (1)$$

где $U_{p,и}$ – амплитуда импульса напряжения размагничивания сердечников ВЭ и МЖ на частоте размагничивания; $Z_{э} = N_B$; $X_L = 2\pi f_{p1} L_{э}$ – индуктивное сопротивление ВЭ; $L_{э}$ – индуктивность ВЭ; N_B – число витков ВЭ; $\tau_{p,и}$ – длительность импульсов размагничивания.

Импульсы размагничивания сердечников ВЭ следуют с удвоенной частотой вибросигнала $2f_c$ и с частотой размагничивания f_{p1} , например: $f_{p1} = 500$ Гц при $f_c = 50$ Гц (рис. 1, а, б). Амплитуда импульсов размагничивания выбрана равной $U_{p,и} = 300$ В.

Для сердечников ВЭ ЭМП длительность импульсов размагничивания принимаем равной $\tau_{p,и} = T_c / (2 \cdot 3,5)$ (до 1/7 периода вибросигнала), где T_c – период основной гармоники вибросигнала. Индуктивность ВЭ принимаем равной $L_{э} = 6,455 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Далее проведем расчет импульсных токов ВЭ для размагничивания сердечников ВЭ и размагничивания МЖ в ЭМП гидропоры.

1. Определим импульсный ток размагничивания сердечников ВЭ при $U_{p,и} = 300$ В.

Индуктивное сопротивление $X_{L,1}$ ВЭ на переменном токе с частотой размагничивания $f_{p1} = 500$ Гц определено [10] как

$$X_{L,fp1} = 2\pi f_{p1} L_{\Sigma} = 2\pi \cdot 0,5 \cdot 10^3 \cdot 6,4 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление Z_{Σ} катушки ВЭ с числом $N_B = 715$ на частоте размагничивания $f_{p1} = 500$ Гц составило

$$Z_{\Sigma,fp1} = N_B \cdot X_{L,fp1} = 715 \cdot 20 = 14300 \text{ Ом.}$$

По выражению (1) определяем мощность импульса размагничивания для сердечников ВЭ на частоте размагничивания $f_{p1} = 500$ Гц:

$$\begin{aligned} P_{p,и,fp1} &= \frac{U_{p,и}^2}{Z_{\Sigma,fp1}} \tau_{pи} f_{p1} = \\ &= \frac{300^2}{14300} \cdot \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 3,5} \cdot 500 = 8,99 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Импульсный ток размагничивания для сердечников ВЭ на частоте размагничивания $f_{p1} = 500$ Гц определяется по формуле [10]

$$\begin{aligned} I_{p,и,fp1} &= \frac{U_{p,и}}{Z_{\Sigma,fp1}} \tau_{pи} f_{p1} = \\ &= \frac{300}{14300} \cdot \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 3,5} \cdot 500 = 0,0299 \text{ А.} \end{aligned}$$

и обеспечивает магнитный поток в импульсе $\Phi_{m,и} = B_{\delta m} S_{\delta} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ Вб.

В результате сердечники ВЭ ЭМП размагничены импульсным переменным магнитным полем с индукцией $B = 1,885$ Тл и с частотой размагничивания $f_{p1} = 500$ Гц. При этом дроссельный канал для дросселирования МЖ остается закрытым.

2. Определим импульсный ток размагничивания для МЖ. Индуктивное сопротивление $X_{L,2}$ ВЭ на переменном токе с частотой $f_{p2} = 3000$ Гц определено как [10]

$$\begin{aligned} X_{L,fp2} &= 2\pi f_{p2} L_{\Sigma} = \\ &= 2\pi \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 6,455 \cdot 10^{-3} = 121 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Полное сопротивление Z_{Σ} катушки ВЭ с числом $N_B = 715$ на частоте размагничивания $f_{p2} = 3000$ Гц составило

$$Z_{\Sigma,fp2} = N_B \cdot X_{L,fp2} = 715 \cdot 121 = 86515 \text{ Ом.}$$

По выражению (1) определяем мощность импульса размагничивания при $U_{p,и} = 300$ В для МЖ на частоте размагничивания $f_{p2} = 3000$ Гц:

$$\begin{aligned} P_{p,и,fp2} &= \frac{U_{p,и}^2}{Z_{\Sigma,fp2}} \tau_{pи} f_{p2} = \\ &= \frac{300^2}{86515} \cdot \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 3,5} \cdot 3000 = 8,92 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Импульсный ток размагничивания МЖ на частоте $f_{p2} = 3000$ Гц определен как [10]

$$\begin{aligned} I_{p,и,fp2} &= \frac{U_{p,и}}{Z_{\Sigma,fp2}} \tau_{pи} f_{p2} = \\ &= \frac{300}{86515} \cdot \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 3,5} \cdot 3000 = 0,0297 \text{ А} \end{aligned}$$

и обеспечивает магнитный поток в импульсе $\Phi_{m,и} = B_{\delta m} S_{\delta} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ Вб.

В результате МЖ размагничена импульсным переменным магнитным полем с индукцией $B = 1,885$ Тл и с частотой размагничивания $f_{p2} = 3000$ Гц. При этом дроссельный канал для дросселирования МЖ остается закрытым [1–3]. По данной методике проводится расчет импульсных токов размагничивания сердечников ВЭ и размагничивания МЖ для остальных частот f_{pi} для частотного диапазона работы гидроопоры с ЭМП до частоты $f_B = 50$ Гц (табл. 1).

Анализ результатов проведенного расчета импульсных токов размагничивания сердечников ВЭ ЭМП и размагничивания МЖ показывает, что закрывание дроссельных каналов ЭМП гидроопоры осуществляется суммарным сигналом возбуждения и размагничивания, сформированным из отдельных импульсных сигналов (рис. 1,а,б). Причем этим суммарным сигналом достигается одновременное возбуждение и размагничивание сердечников ВЭ ЭМП и размагничивание МЖ [1–3, 8].

Для сжатия динамического диапазона амплитуд импульсов размагничивания в суммарном сигнале возбуждения и размагничивания длительности импульсов размагничивания сердечников ВЭ и размагничивания МЖ необходимо выбирать равными. Поэтому из расчета импульсных токов при размагничивании выбраны равные временные интервалы $\tau_{pи}$ в длительности суммарного сигнала $T_{c,c}$ для возбуждения и размагничивания сердечников ВЭ и последующего размагничивания МЖ. Временные интервалы для составляющих суммарного сигнала возбуждения и размагничивания на интервале действия вибросигнала распределены по частям следующим образом:

$$T_{c,c} = \left[\left(\frac{1,5}{7} \right) + \left(\frac{1}{7} + \frac{1}{7} \right) \right] + \left[\left(\frac{1,5}{7} \right) + \left(\frac{1}{7} + \frac{1}{7} \right) \right] T_c, \quad (2)$$

где $\tau_{ви} = (1,5/7) \cdot T_c$ – длительность сигналов возбуждения сердечников ВЭ ЭМП; $2 \cdot \tau_{pи} = (1/7 + 1/7) \cdot T_c$ – длительность сигналов размагничивания сердечников ВЭ ЭМП и размагничивания МЖ; T_c – период вибросигнала.

Динамический диапазон электромагнитных импульсов размагничивания достигает $U_{имп,р} = 300$ В при частоте размагничивания $f_{p1} = 500$ Гц (табл. 1). Уменьшить динамический диапазон электромагнитных импульсов размагничивания можно только за счет увеличения длительности импульсов размагничивания периодической последовательности, следующих с удвоенной частотой вибросигнала $2f_c$ и с частотой заполнения f_{p1} (рис. 1,а). Это достигается при условии одновременного размагничивания сердечников ВЭ и размагничивания МЖ за один временной интервал $\tau_{pи}$. Так, если временной интервал размагничивания $\tau_{pи}$ уве-

личить вдвое, то можно достичь уменьшения (сжатия) амплитуды импульса размагничивания вдвое [10–13]. В связи с этим проведен перерасчет амплитуд электромагнитных импульсов и токов размагничивания для сердечников ВЭ (табл. 2).

На рис. 2 представлены зависимости амплитуд электромагнитных импульсов размагничивания $U_{\text{имп.р}}$ сердечников ВЭ и размагничивания МЖ от значений частоты перестройки $f_{\text{в}}$ и частоты размагничивания $f_{\text{р1}}$.

Анализ зависимостей (рис. 2) показывает, что амплитуды электромагнитных импульсов размагничивания сердечников ВЭ и размагничивания МЖ при длительности $\tau_{\text{ри}}$ и $2 \cdot \tau_{\text{ри}}$ возрастают линейно и могут быть определены через отношение управляющих параметров размагничивания ВЭ ЭМП гидропоры:

$f_{\text{р1}}$ – частоту размагничивания и $U_{\text{р.и.}}$ – напряжение размагничивания на катушке ВЭ [1–3].

Отношение управляющих параметров размагничивания сердечников ВЭ и МЖ при перестройке ЭМП гидропоры является величиной постоянной и определяется выражением [2]

$$\frac{U_{\text{р.и.}} \left[\frac{\text{В}}{\text{Гц}} \right]}{f_{\text{р1}}} \approx 2\pi N_{\text{В}} \Phi_{\text{п.р.и.}} \approx 2\pi N_{\text{В}} L_{\text{Э}} I_{\text{э.р.и.}} =$$

$$= 2\pi N_{\text{В}} \frac{X_L}{2\pi f_{\text{р1}}} = \text{const}, \quad (3)$$

где $\Phi_{\text{п.р.и.}}$ – импульсный магнитный поток размагничивания сердечников в полюсах ВЭ; $I_{\text{э.р.и.}}$ – импульсный ток размагничивания ВЭ.

Импульсный магнитный поток размагничивания сердечников в полюсах ВЭ является магнитным потоком удержания для МЖ в дроссельных каналах гидропоры с ЭМП.

Таблица 1. Расчет импульсных токов размагничивания сердечников ВЭ и размагничивания МЖ для частот $f_{\text{р1}}$ частотного диапазона работы гидропоры с ЭМП (до частоты $f_{\text{в}} = 50 \text{ Гц}$).

| Параметры сигнала возбуждения и размагничивания ферромагнитных сердечников и МЖ для различных частот вибросигнала. | | | | | | |
|--|-----------------------------|------------------------------|---|--|-------------------------------|------------------------------|
| $f_{\text{в}}, \text{ Гц}$ | $f_{\text{р1}}, \text{ Гц}$ | $U_{\text{р.и.}}, \text{ В}$ | $\tau_{\text{ри}} = \tau_{\text{р.1}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{ри}} = \tau_{\text{р.мж}} = \tau_{\text{р.2}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{ви}}, \text{ с}$ | $I_{\text{р.и.}}, \text{ А}$ |
| 10 | 100 | 60 | 0,0142 | 0,0142 | 0,0213 | 0,0299 |
| 20 | 200 | 120 | 0,0071 | 0,0071 | 0,01065 | 0,0299 |
| 30 | 300 | 180 | 0,0047 | 0,0047 | 0,00705 | 0,0299 |
| 40 | 400 | 240 | 0,0035 | 0,0035 | 0,00525 | 0,0299 |
| 50 | 500 | 300 | 0,0028 | 0,0028 | 0,0042 | 0,0299 |

| Ликвидация аномальной магнитной вязкости МЖ, обусловленной гистерезисом ферромагнитных сердечников ВЭ. | | | | |
|--|-----------------------------|------------------------------|--|------------------------------|
| $f_{\text{в}}, \text{ Гц}$ | $f_{\text{р2}}, \text{ Гц}$ | $U_{\text{р.и.}}, \text{ В}$ | $\tau_{\text{ри}} = \tau_{\text{р.мж}} = \tau_{\text{р.2}}, \text{ с}$ | $I_{\text{р.и.}}, \text{ А}$ |
| 50 | 3000 | 300 | 0,0028 | 0,0299 |

Примечание: $\tau_{\text{ви}} = (1,5/7) T_{\text{с}}$ – длительность сигналов возбуждения сердечников ВЭ ЭМП; $2 \cdot \tau_{\text{ри}} = (1/7 + 1/7) \cdot T_{\text{с}}$ – длительность сигналов размагничивания сердечников ВЭ ЭМП и последующего размагничивания МЖ; $T_{\text{с}}$ – период вибросигнала.

Таблица 2. Расчет импульсных токов размагничивания сердечников ВЭ и размагничивания МЖ для частот $f_{\text{р1}}$ частотного диапазона работы гидропоры с ЭМП (до частоты $f_{\text{в}} = 50 \text{ Гц}$) – сжатый вдвое динамический диапазон амплитуд электромагнитных импульсов размагничивания

| Параметры сигнала возбуждения и размагничивания ферромагнитных сердечников и МЖ для различных частот вибросигнала. | | | | | |
|--|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| $f_{\text{в}}, \text{ Гц}$ | $f_{\text{р1}}, \text{ Гц}$ | $U_{\text{р.и.}}, \text{ В}$ | $\tau_{\text{ри}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{ви}}, \text{ с}$ | $I_{\text{р.и.}}, \text{ А}$ |
| 10 | 100 | 30 | 0,0284 | 0,0213 | 0,0299 |
| 20 | 200 | 60 | 0,0142 | 0,01065 | 0,0299 |
| 30 | 300 | 90 | 0,0094 | 0,00705 | 0,0299 |
| 40 | 400 | 120 | 0,007 | 0,00525 | 0,0299 |
| 50 | 500 | 150 | 0,0056 | 0,0042 | 0,0299 |

| Ликвидация аномальной магнитной вязкости МЖ, обусловленной гистерезисом ферромагнитных сердечников ВЭ. | | | | | |
|--|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| $f_{\text{в}}, \text{ Гц}$ | $f_{\text{р2}}, \text{ Гц}$ | $U_{\text{р.и.}}, \text{ В}$ | $\tau_{\text{ри}}, \text{ с}$ | $\tau_{\text{ви}}, \text{ с}$ | $I_{\text{р.и.}}, \text{ А}$ |
| 50 | 500 | 150 | 0,0056 | 0,0042 | 0,0299 |

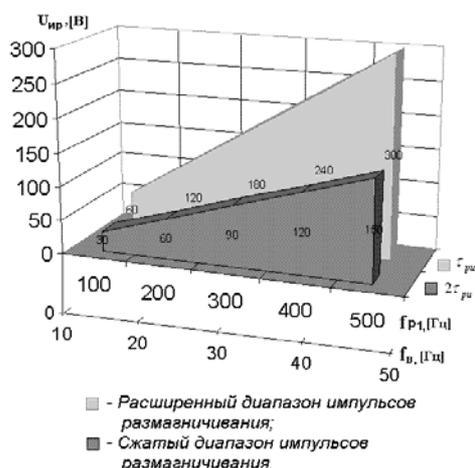


Рис. 2. Зависимости амплитуд электромагнитных импульсов размагничивания сердечников ВЭ и размагничивания МЖ от значений частоты перестройки f_B и частоты размагничивания f_{p1} (τ_{p1} и $2 \cdot \tau_{p1}$ – длительность сигналов размагничивания сердечников ВЭ)

Заключение

На основании проведенных исследований сделан следующий вывод. Ликвидировать остаточную магнитную индукцию сердечников ВЭ и аномальную магнитную вязкость МЖ в дроссельных каналах ЭМП, влияющих на его динамические АЧХ, возможно путем формирования суммарного сигнала возбуждения и размагничивания, состоящего из отдельных электромагнитных импульсных сигналов, в блоке возбуждения ЭМП гидроопоры. При этом в дроссельных каналах необходимо создавать постоянный магнитный поток удержания МЖ при размагничивании ферромагнитных сердечников ВЭ и МЖ во всей полосе перестройки ЭМП гидроопоры по частоте возбуждения f_B [1–3].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Гранта РФФИ «Нелинейная волновая динамика и устойчивость роторных систем» (2011г. № 11-08-97066-Р_Поволжье).

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 гидроопор / 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 гидроопор 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 гидроопор при ударных нагрузках / Б.А. Гордеев, С.А. Булгакова, С.Ф. Тумаков, С.Н. Охулков // VIII Всероссийский науч. конф. «Нелинейные колебания механических систем». – Н. Новгород, 2008, Т. 2. – С. 85–89.

7. Гордеев Б.А., Осмехин А.Н., Охулков С.Н. Зависимость динамических характеристик гидравлических демпферов от температуры рабочей жидкости // X Всероссийский семинар «Инженерно-физические проблемы новой техники». – Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 174–176.

8. Охулков С.Н. Разработка метода расчета и конструкции магнитореологических трансформаторов гидроопор: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук / Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

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.: Высшая школа, 1978. – 232 с.

11. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений: Учеб. пособие для вузов. – Л. Энергоатомиздат. Ленинград. отд - ние, 1987. – 320 с.

12. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1964. – 847 с.

13. Справочник по радиоэлектронным устройствам. В 2 т. Т. 2 / Р.Г. Варламов, С.Д. Додик, А.И. Иванов–Цыганов и др.; под ред. Линде. – М.: Энергия, 1978. – 328 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 konstruktsiya induktsionnogo magnitnoreologicheskogo transformatora 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 magnitnoreologicheskimi 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. *Ekspperimental'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 magnitnoreologicheskoy 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 magnitnoreologicheskikh 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 gidravlicheskh dempferov ot temperatury rabochey zhidkosti* [Dependence of dynamic parameters of hydraulic dampers on the working fluid temperature]. *X Vserossiyskoe soveshchanie-seminar «Inzhen-*

erno-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 konstruksii 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.]. Nizhniy 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.

13. Varlamov, R.G., Dodik, S.D., Ivanov-Tsyganov, A.I. *Spravochnik po radioelektronnyim ustroystvam, v 2 t., t. 2* [Radioelectronic devices reference book]. Moscow, Energiya, 1978. 328 p.

Гордеев Борис Александрович,

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

Охулков Сергей Николаевич,

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

Осмехин Александр Николаевич,

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

Плехов Александр Сергеевич,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование судов»,
e-mail: arplehov@mail.ru