

УДК 534

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРОВ

© Борис Александрович Гордеев, Владимир Иванович Ерофеев,  
Сергей Николаевич Охулков

*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия*  
[gord349@mail.ru](mailto:gord349@mail.ru)

*Аннотация.* В работе рассматривается подход к решению актуальной задачи по исследованию свойств магнитоологических жидкостей (МРЖ) под действием стохастических нагрузок с учётом действия внутренних и внешних электромагнитных полей. Рассмотрены процессы, возникающие в МРЖ при действии стохастических нагрузок. Рассмотрены физические предпосылки управления характеристиками МРЖ с учетом внутренних электромагнитных полей.

**Ключевые слова:** магнитоологический трансформатор, магнитоологическая жидкость, дроссельный канал, обмотка соленоида, индуцированные импульсы, внутреннее управляющее магнитное поле.

## EVALUATION OF THE INFLUENCE OF INTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELDS ON CHARACTERISTICS OF MAGNETORHEOLOGICAL DAMPERS

© B.A.Gorgeev, V.I.Erofeev, S.N.Okhulkov

*Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russia*  
[gord349@mail.ru](mailto:gord349@mail.ru)

**Abstract.** This paper describes the approach to solving the urgent problems of the study of the properties of magnetorheological fluids (MRF) under the action of stochastic loads, given the internal and external electromagnetic fields. The processes that occur in the MRF under the action of stochastic loads. The physical background of the control characteristics of the MRF with respect to the internal electromagnetic fields.

**Keywords:** magnetorheological transformer, magnetorheological fluid, a throttle channel, the winding of the solenoid, induced pulses, controlling the internal magnetic field.

### Введение

Постоянное повышение мощностей силовых электромеханических установок и механического оборудования приводит к возрастанию уровней и расширению вибрационного спектра колебаний, влияющих на надежность и безопасность их функционирования, что

обуславливает необходимость совершенствования виброзащитных систем и внедрение новых технических решений. Перспективной в настоящее время является разработка демпферов колебаний стохастических нагрузок с магнитореологическими трансформаторами (МРТ). В них диссипация энергии колебаний происходит в магнитореологических средах [1 - 3].

Ограничением выбора МРЖ для данных задач является появление индуцированных электромагнитных импульсов на обмотке соленоида, предназначенного для создания внутреннего управляющего магнитного поля. Амплитуда и длительность этих импульсов является функцией стохастических нагрузок. Их влияние необходимо учитывать при разработке магнитореологических демпферов. Приводится схема экспериментальной установки для стохастических испытаний одноканального индукционного магнитореологического демпфера стохастических нагрузок, обсуждаются полученные результаты исследований.

Процесс создания интегральных демпферов (гидроопор) связан с применением МРЖ, в инерционных МРТ систем демпфирования вибрации и ударов для электротехнических комплексов [1 - 3]. Поэтому одной из актуальных задач является исследование свойств МРЖ под действием нестационарных вибронагрузок. Возможность управления магнитной вязкостью МРЖ в дроссельных каналах МРТ под действием внутренних и внешних электромагнитных полей подтверждена экспериментально [4,5].

При описании движения магнитореологических и электрореологических сред при действии магнитного поля принимаются следующие условия [4,6,7]:

$$\omega_0 \tau \ll 1$$

где  $\omega_0$  - ларморова частота прецессии для ионизированных молекул рабочей жидкости,  $\tau$  – среднее время свободного пробега ионизированной частицы, электропроводность –  $\gamma$  велика, следовательно:

$$\frac{\varepsilon}{4\pi} \cdot \frac{\omega}{\gamma} \ll 1, \quad (1)$$

где  $\omega$  - частота внешнего сигнала,  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

При дросселировании электрореологической жидкости в магнитном поле возникает индукционный ток с плотностью:

$$\mathbf{J} = \frac{\gamma}{c} [\mathbf{VH}], \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света,  $\mathbf{H}$  - напряженность внешнего магнитного поля,  $\mathbf{V}$  - скорость протекания электрореологической жидкости [4,7].

С целью проверки действия стохастического механического импульса на одноканальный индукционный МРТ была создана экспериментальная установка для стохастических испытаний. Функциональная схема установки представлена на рис. 1.

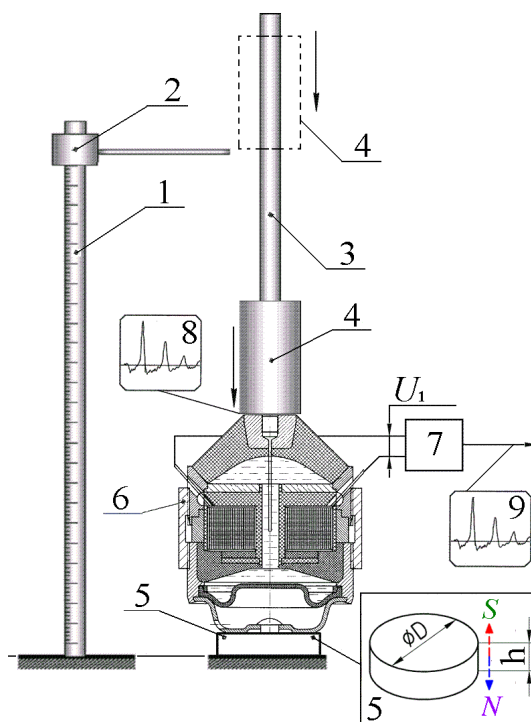


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для стохастических испытаний одноканального индукционного магнитореологического демпфера в момент механического удара падающего груза.

На рис.1 показано: 1 – измерительная линейка; 2 – указатель высоты с нониусом; 3 – шток; 4 – цилиндрический диамагнитный латунный груз; 5 – нижнее основание – силовой постоянный неодимовый магнит; 6 – индукционный МРТ с соленоидом; 7 – электронный запоминающий осциллограф; 8 – виброграмма механического удара; 9 – электрический индуцированный сигнал

Особенностью установки стохастических испытаний магнитореологического демпфера с индукционным МРТ является применение соленоида, в обмотке которого индуцируются электрические токи при перемещении стальной стержневой части винта-пробки в дроссельном канале. В качестве нижнего основания применён неодимовый постоянный магнит, создающий неоднородное магнитное поле и пронизывающее магнитореологический демпфер. Неодимовые постоянные магниты обладают магнитной силой и магнитной индукцией до 1,45 Тл [8].

Были проведены эксперименты по выявлению на выходе соленоида МРТ разности потенциалов  $U_1$ , возникающей в результате удара. При проведении экспериментов применялась МРЖ, с частицами магнетита ( $Fe_3O_4$ ) в неоднородном магнитном поле неодимового постоянного магнита. Размер частиц МРЖ  $d$  в пределах 60 -100 нм.

Под действием ударного (рис. 1) механического импульса при движении МРЖ и перемещения стержневой части винта-пробки в дроссельном канале МРТ и воздействия постоянного магнитного поля неодимового постоянного магнита 5 в соленоиде МРТ

наводятся - индуцируются электрические токи, которые на разомкнутой обмотке соленоида создают разность потенциалов  $U_1$ . Разность потенциалов фиксируется электронным запоминающим осциллографом (рис. 1).

При проведении экспериментов были зафиксированы индуцированные электрические сигналы с экрана запоминающего осциллографа, что указывало на индукционные электрические токи, возникающие в соленоиде МРТ вследствие ударов цилиндрического парамагнитного (латунного) груза (рис. 1).

На рис. 2 приведена осциллограмма индуцированного электрического сигнала на выходе индукционного МРТ соответствующая поглощённой энергии удара в 2,5 Дж. Это происходит при механическом ударе груза массой в 1,0 кг. Положительная амплитуда сигнала – 620 мВ; отрицательная амплитуда – 800 мВ; период электрического импульса – 2,0 мс.

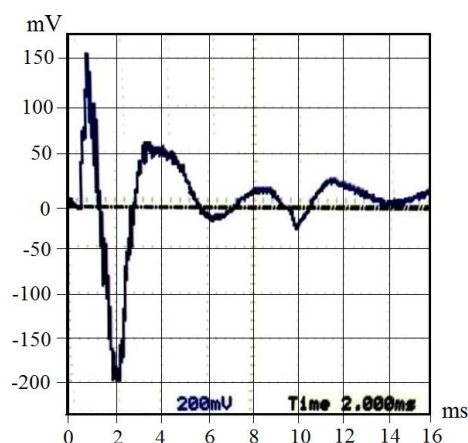


Рис.2. Осциллограмма индуцированного электрического сигнала на выходе индукционного МРТ при механическом ударе, высота падения груза 100 мм, масса груза 1,0 кг.

Положительная и отрицательная амплитуды индуцированного электрического напряжения при механическом ударе зависят от высоты падения груза (рис.3). Таким образом, высоты падения груза определяют величину энергии удара, которая гасится виброопорой с индукционным МРТ.

Наибольшая отрицательная амплитуда индуцированного электрического сигнала (рис.3) после падения груза с высоты в 225 мм объясняется отдачей резинометаллической обечайки индукционного МРТ. Жидкостное магнитное трение МРЖ оказывает малое сопротивление течению МРЖ и перемещению внутри дроссельного канала стержневой части винта-пробки МРТ (рис. 1), так как скорость возврата рабочего объёма МРТ в исходное состояние большая. В этом случае скорость течения МРЖ в дроссельном канале МРТ наибольшая, а при наибольшей скорости течения МРЖ в дроссельном канале при действии постоянного магнитного поля в соленоиде индуцируется наибольшая отрицательная амплитуда электрического сигнала.

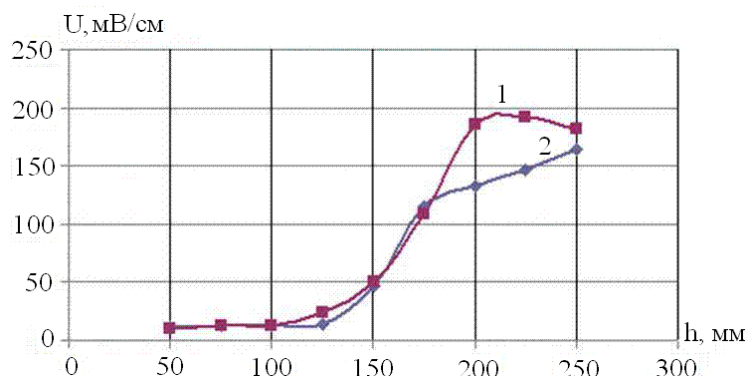


Рис.3. Зависимости положительной и отрицательной амплитуд индуцированного электрического сигнала при механическом ударе груза от высоты  $H$  падения груза. Масса груза 1,0 кг: 1- отрицательная максимальная амплитуда сигнала; 2 - положительная максимальная амплитуда сигнала.

Магнитная сила, создаваемая движением МРЖ в дроссельном канале МРТ с проницаемостью  $\mu$  от давления в рабочей камере и магнитной индукцией внешнего магнитного поля постоянного магнита, определяется как  $\mathbf{J} \times \mathbf{B} = -\text{grad } p_M$ , где  $\mathbf{B}$  – индукция магнитного поля,  $p_M$  – магнитное давление [6,7].

Магнитное давление, представлено в виде:

$$p_M = \left| -\frac{\mu}{8\pi} \mathbf{H}^2 \right|. \quad (3)$$

Здесь  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость МРЖ. Для статических условий из уравнения следует, что

$$p + p_M = 0 \quad \text{и} \quad p = -p_M.$$

Это означает, что в условиях статического равновесия любое изменение механического давления  $p$  МРЖ должно компенсироваться противоположным изменением магнитного давления  $p_M$ , что должно быть отражено через Единицы измерения в системе СИ.

В МРЖ создается градиент давления [7], уравновешивающий составляющую электромагнитной силы

$$\gamma \cdot v \cdot \mu \cdot \mathbf{B}^2 = \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (4)$$

где единицы измерения в системе СИ [6]:  $\gamma$  [См] – электропроводность МРЖ,  $1 \text{ См} = \text{А}/\text{В} = \text{с}^3 \cdot \text{А}^2 / (\text{кг} \cdot \text{м}^3)$ ;  $v$  [м/с] – скорость МРЖ в дроссельном канале;  $\mathbf{B}$  [Тл] – магнитная индукция,  $1 \text{ Тл} = \text{В} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = \text{кг} / (\text{с}^2 \cdot \text{А})$ ;  $p$  [Па] =  $\text{Н} / \text{м}^2 = \text{кг} / (\text{с}^2 \cdot \text{м})$ ;  $z$  [м] – длина дроссельного канала;  $\mu = 10$  – относительная магнитная проницаемость МРЖ.

Для магнитореологического демпфера «упругое» действие внешнего магнитного поля на МРЖ основано на его силовом воздействии. Здесь, созданное им магнитное давление велико, по сравнению с остальными динамическими факторами – гидравлическим

динамическим давлением и инерциальными силами [7], создаваемыми при течении МРЖ в дроссельном канале, когда

$$\frac{\mu \cdot \mathbf{H}^2}{8\pi} \gg \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad \frac{\mu \cdot \mathbf{H}^2}{8\pi} \gg p, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность МРЖ.

Далее оценим магнитную силу магнитного поля в дроссельном канале соленоида, которая препятствует механическому давлению МРЖ в дроссельном канале при действии механического удара по МРТ.

Сила падающего груза массой  $m = 1,0$  кг с высоты в  $H = 0,6$  м при скорости падения  $v_r = 0,6$  м/с, ускорении свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> и длительности удара взятой из осциллограммы, равной  $t_{и} = 1,0$  мс (рис.2) определена как [6]:

$$\mathbf{F} = \frac{m \cdot v_r}{t_{и}} = \frac{1,0 \cdot 0,6}{1,0 \cdot 10^{-3}} = 600 \text{ Н.}$$

При такой силе удара груза создаваемое давление на опорную плату обечайки МРТ (рис.1) площадью  $S_{оп} = 0,707 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  определяется как [6]:

$$P = \frac{\mathbf{F}}{S_{оп}} = \frac{600 \text{ Н}}{0,707 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2} \cong 848 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Определим магнитную силу – магнитное давление, создаваемое в дроссельном канале МРТ [7], при минимальной напряженности магнитного поля  $\mathbf{H} = 20 \cdot 10^3$  А/м (рис. 4).

$$P_M = \left| -\frac{\mu}{8\pi} \mathbf{H}^2 \right| = \frac{\mu}{8\pi} (20 \cdot 10^3)^2 \cong 160 \cdot 10^6 \text{ А}^2/\text{м}^2.$$

Именно такое магнитное давление и создает магнитную силу, которая и препятствует механическому давлению МРЖ на входе/выходе дроссельного канала МРТ при действии магнитного поля постоянного магнита, и оно превышает гидравлическое давление МРЖ.

Тогда отношение давлений  $P_M$  и  $P$  будет равно:

$$\frac{P_M}{P} = \frac{160 \cdot 10^6}{0,848 \cdot 10^6} = 188,6. \quad (6)$$

Здесь магнитное давление  $P_M$  от магнитного поля постоянного магнита в 188,6 раз больше гидравлического давления  $P$  от действия инерционной нагрузки падающего груза, что составляет 45 дБ.

Отношение давлений  $P_M$  и  $P$  показывает, что при работе магнитореологического демпфера желательна наибольшая намагниченность МРЖ.

На рис. 4 представлены зависимости динамической вязкости образцов МРЖ (МРЖ-1 и МРЖ-2) для различных значений напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$ .

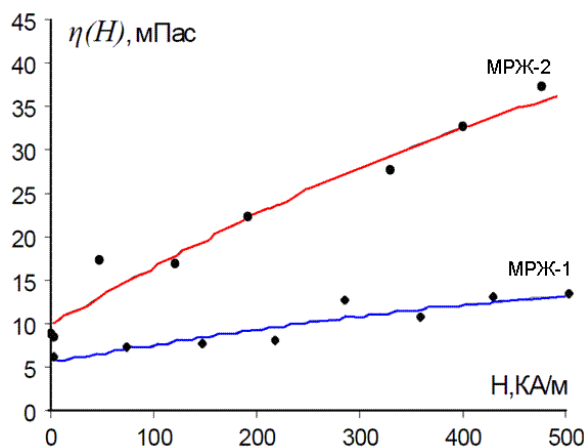


Рис.4. Зависимости изменения динамической вязкости для МЖ-1 и МЖ-2 от напряженности магнитного поля

## Заключение

В работе рассмотрен подход к решению актуальной задачи по исследованию свойств магнитоологических жидкостей под действием стохастических, в том числе ударных нагрузок и действия внутренних и внешних электромагнитных полей в магнитоологическом демпфере. Приведена схема экспериментальной установки испытаний магнитоологического демпфера случайных нагрузок. Получены результаты исследований. Определена магнитная сила – магнитное давление магнитного поля в дроссельном канале соленоида МРТ, препятствующее механическому давлению МРЖ в дроссельном канале при действии механического удара по МРТ, что позволило оценить демпфирование механического удара.

Проведённый анализ положительной и отрицательной амплитуд индуцированного электрического сигнала при механическом ударе груза позволяет выбрать соответствующую МРЖ для различных МРТ электротехнических комплексов.

*Работа выполнялась при поддержке Российского научного фонда (грант №14-19-01637).*

## Список литературы

1. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Синев А.В., Мугин О.О. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред. М.: Физматлит, 2004. 176 с.
2. Гордеев Б.А., Маслов Г.В., Охулков С.Н., Осмехин А.Н. К вопросу создания цилиндрического магнитоологического трансформатора в ортогональных магнитных полях // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2014, №2 С.15-21.
3. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Злобин П.А. Применение магнитоологических жидкостей в машиностроении // Приволжский научный журнал. 2014, № 4. С.29-42.
4. Гордеев Б.А., Морозов П.Н., Синев А.В. Влияние внешнего магнитного поля на плотность потока энергии в магнитоологическом трансформаторе // Проблемы машиностроения и надёжность машин. 2004, №4. С.100-104.

5. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Титов Д.Ю., Горсков В.П. Течение и релаксация магнитореологической жидкости в дроссельных каналах гидроопор // Вестник машиностроения. 2015, №7. С.59-63.
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука. 1964.
7. Кухаркин Е. С. Инженерная электрофизика. Техническая электродинамика. / Под ред. П. А. Ионкина. Учебник для вузов – 2-е изд. перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1982. 520 с, ил.
8. Михайлин С.В., Житковский В.Д. Постоянные магниты из магнитопластов // Справочник. 1999, № 9(30). С.8-9.

*Дата поступления статьи: 29 октября 2016 года.*