

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ГИДРООПОРЫ¹

Доктор техн. наук, профессор, Главный научный сотрудник **Гордеев Б.А.**
(Институт проблем машиностроения Российской академии наук. ИПМ РАН, Н. Новгород)

Кандидат физ.-мат. наук, с.н.с. ИПМ РАН, доцент НГТУ **Охулков С.Н.**
(Институт проблем машиностроения Российской академии наук. ИПМ РАН, Н. Новгород;
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. НГТУ)

Кандидат техн. наук **Осмехин А.Н.**
(Акционерное общество «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И.Африкантова», Н. Новгород)

Младший научный сотрудник **Ермолаев А. И.**
(Институт проблем машиностроения Российской академии наук. ИПМ РАН, Н. Новгород)

IMPROVE THE RELIABILITY OF WORK OF THE MAGNETIC CONTROLLED HYDRO-SUPPORT

Doctor (Tech), Professor, Ch. Researcher **Gordeev B.A.**
(Institute for Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, IPM RAS. N. Novgorod)

Ph. D. (Phys.-Math.), Senior Researcher (IPM RAS), Associate Professor (NSTU) **Ohulkov S.N.**
(Institute for Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, IPM RAS. N. Novgorod ;
Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva. NSTU)

Ph. D. (Tech) **Osmechin A. N**
(Joint-stock company “Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering named after I.Afrikontov”, N. Novgorod)

Junior Researcher **Ermolaev A. I.**
(Institute for Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, IPM RAS. N. Novgorod)

Магнитореологический трансформатор, магнитореологическая жидкость, седиментация, трёхфазный индуктор, вращающееся магнитное поле, управление вязкостью.

Transformer magneto-rheological, magneto-rheological fluid, sedimentation, three-phase coil, a rotating magnetic field control of viscosity.

В статье рассмотрены новые подходы к оптимизации параметров магнитореологического трансформатора (МРТ). Рассмотрено влияние вихревого магнитного поля на седиментацию магнитных частиц в магнитореологической жидкости (МРЖ), меняющей свою вязкость под действием переменного магнитного поля. Показано, что целесообразно, кроме одного дроссельного канала, ввести дополнительный коаксиальный дроссельный канал, расположенный в виде зазора между коаксиальными цилиндрами. Вращающееся вихревое магнитное поле в этом канале управляет потоком МРЖ и устраняет седиментацию рабочей МРЖ в магнитоуправляемой гидроопоре. Проведён эксперимент подтверждающий предложение авторов.

The article considers new approaches to optimization of magneto-rheological transformer (MRI) parameters. The effect of the vortex magnetic field on the sedimentation of magnetic particles in a magneto-rheological fluid (MRF) changing its viscosity under the action of an alternating magnetic field is considered. It is shown that it is advisable to introduce an additional coaxial choke channel located in the form of a gap between the coaxial cylinders in addition to one choke channel. The rotating magnetic vortex in this channel controls the flow of the GRM and eliminates the sedimentation of the working GRM in the magnetically controlled hydraulic support. The experiment confirms the proposal of the authors.

Введение

В настоящее время для активных систем виброзащиты, таких как магнитоуправляемые гидроопоры с магнитореологическими трансформаторами (МРТ), не применялись широко способы регулирования вязкости магнитореологической жидкости (МРЖ) вращающимся магнитным полем [1-4]. Создание такого поля приводит не только к изменению вязкости МРЖ, но и к генерации магнитного вихря [5], который замедляет процессы седиментации МРЖ, противодействуя гравитационным силам [6]. Это имеет важное значение в железнодорожном транспорте, так как применение магнитоуправляемых гидроопор там наиболее актуально [13,14].

В работах [1-4, 7] показано применение постоянного магнитного поля, или меняющегося с частотой основной гармоники входного вибросигнала для управления демпфированием гидроопоры.

Регулирование вязкости МРЖ осуществляется в этих случаях за счет изменения напряжённости постоянного магнитного поля в дроссельных каналах и не влияет на седиментацию магнитных частиц. Поэтому необходимо совершенствовать методы управления вязкостью и регулирования расхода

МРЖ при её дросселировании в МРТ. Также необходимо совершенствовать и конструкцию самой гидроопоры с МРТ.

¹ Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

Применение вращающегося магнитного поля для управления вязкостью, создаваемого однофазным индуктором, рассмотрено в работе [10]. В этой же работе показано, что вектор потока электромагнитной энергии вращающегося магнитного поля способствует расщеплению основной гармоники входного вибросигнала на ряд высокочастотных составляющих, которые эффективно демпфируются. Следовательно, можно предположить, что применение трехфазного, или многофазного, кратного трем, индуктора, создающего вращающееся магнитное поле в МРТ магнитоуправляемой гидропоры, повысит эффективность ее работы.

Для создания вращающегося поля в МРТ гидропоры целесообразно применять трёхфазный индуктор, подключённый к преобразователю трёхфазного переменного напряжения [11,12]. Схематичное представление поперечного разреза трёхфазного индуктора МРТ гидропоры с фазными обмотками А – X, В – Y, С – Z, в виде обмоток, смещенных под углами в 120° , представлены на рисунке 1.

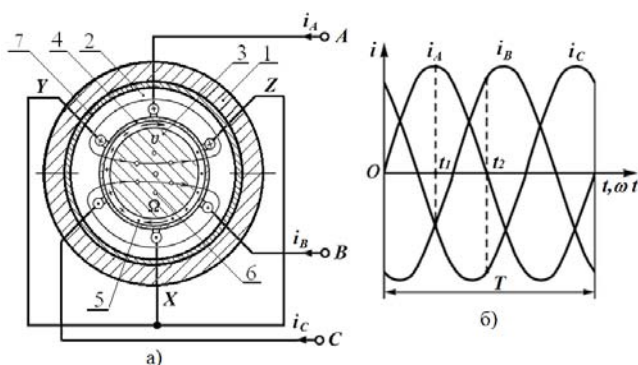


Рис. 1. Схематичное представление поперечного разреза трёхфазного индуктора МРТ гидропоры (а):

- 1 – корпус МР-гидропоры;
- 2 – статор с тремя возбуждающими фазными обмотками А – X, В – Y, С – Z,;
- 3 – внутренний стальной coaxиальный цилиндр;
- 4 – внешний латунный стальной coaxиальный цилиндр;
- 5 – coaxиальный цилиндрический канал с МРЖ;
- 6 – дроссельные капиллярные каналы МРТ.

Волновая диаграмма трехфазных возбуждающих токов МРТ гидропоры (б)

Трёхфазный индуктор МРТ гидропоры состоит из неподвижного статора 2 и неподвижных латунных цилиндров - внутреннего сплошного 3 и внешнего полого 4 - с цилиндрическим дроссельным каналом 5 с МРЖ, с зазором от 0,4 до 1,5 мм (рис. 1,а). Статор 2 индуктора МРТ цилиндрической формы с трёхфазной обмоткой в пазах помещается в общий с гидропорой корпус 1. Корпус 1 стальной или из алюминиевого сплава.

Внутри латунного сплошного цилиндра 3 размещены дроссельные проходные каналы 6 (рис. 1,а). Трёхфазная обмотка 2 статора МРТ подключается к источнику управляемого трёхфазного напряжения (рис. 1,б).

В приведённой конструкции индуктора МРТ (рис. 1,а) в coaxиальном цилиндрическом дроссельном канале рабочая МРЖ делает один оборот вокруг внутреннего латунного сплошного цилиндра 3 за один период вибросигнала.

Coaxиальный дроссельный канал имеет сечение Δl , где Δ – ширина зазора между coaxиальными цилиндрами, l – длина магнитопровода индуктора МРТ и внутренней полости дроссельного канала с рабочей МРЖ.

Трёхфазный индуктор МРТ гидропоры можно отнести к одной из разновидностей магнитогидродинамических машин переменного тока и в нём подвижной частью является сама рабочая МРЖ. Для приведения рабочей МРЖ в движение используется бегущее или вращающееся магнитное поле, образованное трехфазной обмоткой переменного тока внешнего статора. В зависимости от формы дроссельного канала, в котором перемещается рабочая МРЖ в магнитном поле, электромагнитные индукторы МРТ гидропор могут подразделяться на винтовые и линейные.

Скольжение рабочей МРЖ $s_{мж}$ относительно вращающегося кругового поля в трехфазном индукторе МРТ гидропоры

$$s_{мж} = (v - v_1) / v = 1 - v_1 / v, \quad (1)$$

где v – линейная скорость вращающегося кругового поля; v_1 – линейная скорость рабочей МРЖ в coaxиальном дроссельном канале индуктора МРТ.

Результирующий поток остается неизменным и равным 1,5 от максимального потока фазы. Направление этого потока всегда совпадает с направлением магнитного потока той фазы, ток в которой в данный момент максимален. Поэтому для изменения направления вращения магнитного поля необходимо поменять местами любые две фазы [11,12].

Проведённый анализ показывает, что результирующий вектор индукции магнитного поля $\vec{B}(t, x, y)$ имеет постоянную амплитуду ($B_{max} = 3/2 \cdot B_m$) и равномерно вращается в пространстве против часовой стрелки катушки А к катушке В с угловой скоростью ω_n , равной угловой частоте тока ω . Угловая скорость вращения магнитного поля зависит и от числа катушек:

$$\omega_n = \omega / p = 2\pi f / p \quad [\text{рад/с}] \text{ или } [c^{-1}],$$

где p – число пар полюсов и f – частота тока статора индуктора МРТ.

В технике для характеристики вращения магнитного поля пользуются понятием «частоты вращения» [11,12]:

$$n = 60 \cdot f / p \quad [\text{об./мин}].$$

С изменением числа p пространственная картина магнитного поля изменяется: при $p = 1$ магнитное поле имеет два полюса (или одну пару полюсов), при $2p = 2$ – четыре полюса (или 2 пары полюсов) и т.д. По этой причине число $p = 1, 2, 3, \dots$ называют числом пар полюсов магнитного поля.

Рассмотренные примеры относятся к двухполюсной обмотке индуктора МРТ гидропоры ($2p = 2$) при частоте вращения поля $n_1 = 60 \cdot f$.

Структурная схема гидропоры с трёхфазным МРТ и coaxиальным дроссельным каналом, управляемым вращающимся магнитным полем, представлена на (рис. 2).

На рисунке 2 показано: 1, 2 – рабочая и компенсационная камеры; 3 – корпус гидропоры; 4 – опорная плата; 5 – эластичная обечайка; 6 – мембрана; 7 и 8 – внутренний и внешний латунные coaxиальные цилиндры; 9 – ферромагнитный сердечник индуктора МРТ; 10 – трёхфазные обмотки статора индуктора; 11 – продольные дроссельные каналы; 12 – coaxиальный цилиндрический зазор; 13 – входные отверстия; 14, 16 – акселерометры на входе и выходе МРТ; 15 – трёхфазный преобразователь переменного напряжения.

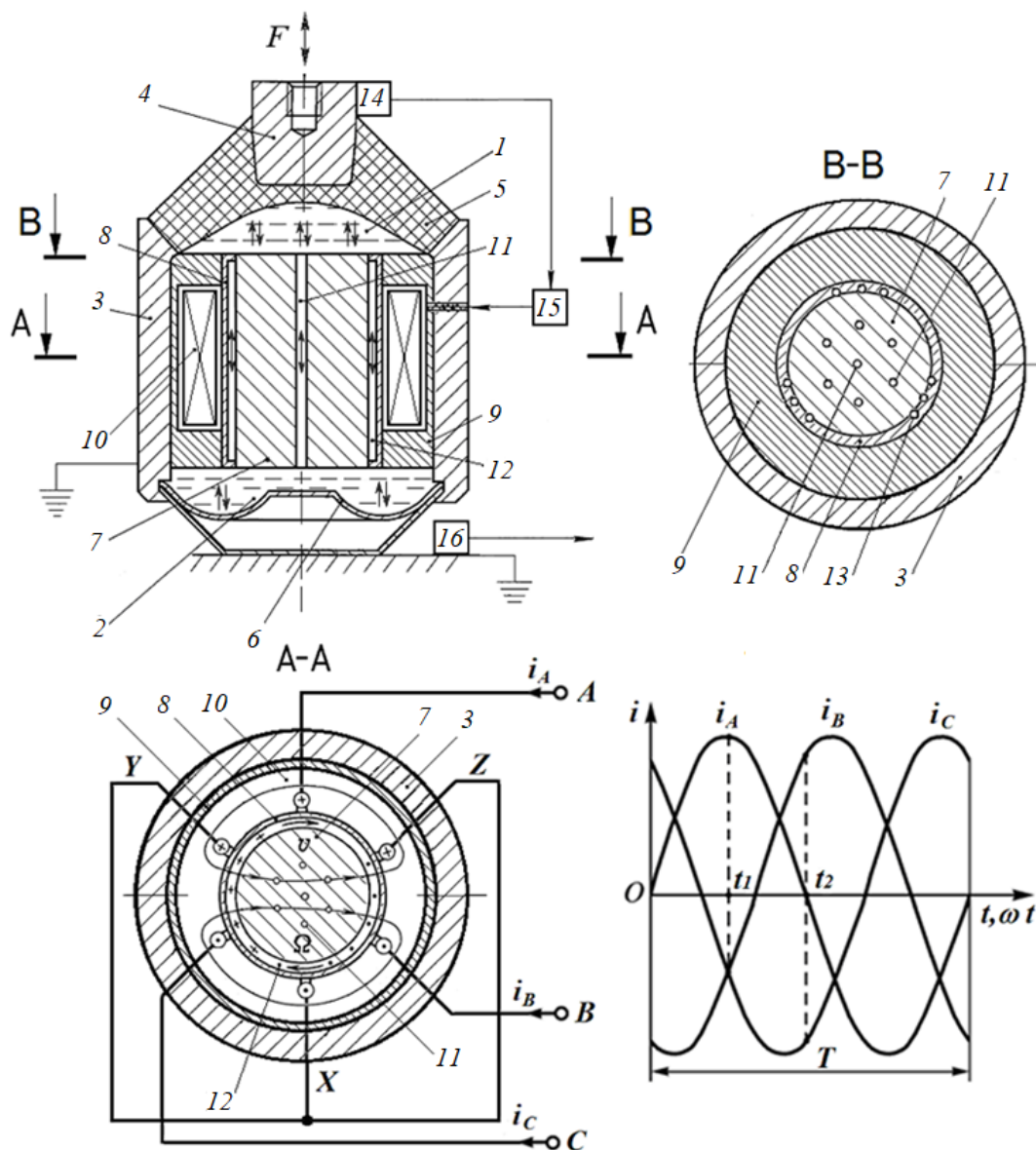


Рис.2. Структурная схема гидроопоры с МРТ с коаксиальным дроссельным каналом, управляемым вращающимся магнитным полем

При создании кругового вращающегося магнитного поля в коаксиальном зазоре МРТ гидроопоры необходимо и достаточно выполнение двух условий.

Условие первое: необходимо в МРТ гидроопоры расположить в пространстве $3p$ одинаковые катушки ($p = 1, 2, 3, \dots$) с равным числом витков так, чтобы их оси были расположены в одной плоскости и сдвинуты взаимно на равные углы $\Delta\alpha = 360^\circ/3p$ [11,12].

Условие второе: необходимо пропустить по катушкам МРТ равные по амплитуде и сдвинутые во времени на $\Delta t = T/3$ или $\Delta\omega t = 360^\circ/3 = 120^\circ$ переменные токи (симметричный трехфазный ток). При соблюдении указанных условий в пространстве вокруг катушек МРТ будет создано круговое вращающееся магнитное поле с постоянной амплитудой индукции B_{max} вдоль его оси и с постоянной угловой скоростью вращения ω_n [11,12].

На рисунках 1 и 2 показано пространственное расположение трех ($p = 1$) одинаковых катушек под равными углами в 120° согласно первому условию.

При выполнении этих условий поток плотности энергии (вектор Умова-Пойнтинга) \mathbf{W}_p , являющийся суммой трёх потоков, создаваемых первой, второй и третьей обмотками МРТ, будет один и тот же, так как

векторы напряженности магнитных полей, индуцируемых токами в этих обмотках, взаимно ортогональны [10]. Тогда результирующий поток плотности энергии определяется суммой трёх потоков $\mathbf{W}_p = \mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2 + \mathbf{W}_p$.

Так как при указанных условиях векторы питающих напряжений, а следовательно, и напряженности магнитных полей, сдвинуты по фазе на $\Delta\alpha = 360^\circ/3p$, то результирующий вектор напряженности магнитного поля, равный сумме магнитных полей, генерируемых обмотками индуктора, описывает окружности [11,12]. Время одного оборота результирующего вектора равно периоду основной гармоники вибросигнала.

Рассмотрим работу гидроопоры с магнитореологическими трансформаторами на рисунке 2.

При действии знакопеременной нагрузки на опорную плату 4 возникает два процесса. В одном из них деформируемая обечайка 5 уменьшает объём рабочей камеры 1. Вследствие этого часть рабочей жидкости через входные отверстия 13 в верхнем и нижнем основаниях внешнего коаксиального цилиндра 8 перемещается в коаксиальный цилиндрический зазор 12 и в компенсационную камеру 2. В эту же камеру 2 часть рабочей жидкости через продольные дроссельные каналы 11

поступает из рабочей камеры 1. Одновременно появляется электрический сигнал с акселерометра 14, поступающий на первый вход трёхфазного преобразователя переменного напряжения 15 блока управления МРТ, на выходе которого формируется также электрический сигнал, но усиленный для питания трёхфазных обмоток 10 электромагнитов индуктора. Возникающее при этом магнитное поле в коаксиальном цилиндрическом зазоре 12 возбуждает находящуюся в нём рабочую МРЖ. Так как магнитные поля, возбуждаемые токами обмоток 10, сдвинуты по фазе на 120° , то на МРЖ в цилиндрическом зазоре 12 кроме поступательного движения действует и её вращательное движение. Таким образом, движение рабочей МРЖ канале 12 происходит по спирали, что приводит к дополнительному трению и снижению седиментации.

Во втором полупериоде выходной электрический сигнал с акселерометра 16 поступает на второй вход трёхфазного преобразователя переменного напряжения 15 блока управления МРТ, на выходе которого опять формируется усиленный электрический сигнал для питания трёхфазных обмоток 10 электромагнитов индуктора. Таким образом, процесс повторяется в обратном направлении.

Заключение.

В подтверждении модели вращающегося поля, создаваемого трёхфазным индуктором, был проведён эксперимент при вращении стальных шариков в полном статоре асинхронного трёхфазного двигателя АИР 63 В4 У3, поставленного вертикально. В итоге вращающееся магнитное поле полого статора поднимало стальные шарики и удерживало их за время питающего напряжения. Этот факт позволяет сделать вывод, что седиментация МРЖ при работе магнитоуправляемой гидропоры будет отсутствовать. МРЖ в коаксиальном зазоре при выполнении данных условий также будет вращаться и перемешиваться. В результате ликвидируется седиментация и, как следствие, повышается эффективность работы гидропоры.

Литература

1. Гордеев Б.А. 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. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Злобин П.А. Применение магнитореологических жидкостей в машиностроении. Статья. // Приволжский научный журнал. - 2014. - № 4. - С.29-42.
3. Гордеев Б.А. Течение и релаксация магнитореологической жидкости в дроссельных каналах гидропор / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов, В.П. Горсков // Вестник машиностроения. – 2015. - №7. - С. 32-38.
4. Гордеев Б. А., Маслов В.Г., Охулков С.Н., Осмехин А.Н. К вопросу создания цилиндрического магнитореологического трансформатора в ортогональных магнитных полях. Статья. // Проблемы машиностроения и надёжности машин. - 2014. - № 2. - С. 15 -21.
5. Такетоми С. Магнитные жидкости / С. Такетоми, С. Тикадзуми, пер. с японск. – М.: Мир, 1993. – 272 с.
6. Шульман З.П. Магнитореологический эффект. / З.П. Шульман, В.И. Кордонский – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.

7. Морозов Н.А. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков - Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2011. – 264 с.

8. Райхер В.В., Русаков Ю. Л. Вращательная вязкость вязкоупругой магнитной жидкости // Коллоидный журнал. – 2008. - №70. - С. 85-92.

9. Гордеев Б.А., Синева А.В., Куплинова Г.С. Патент №2407029 на изобретение Гидравлическая вибропора. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 декабря 2010 года, бюл. № 36.

10. B.A. Gordeev, A.I. Ermolaev, S.N. Okhulkov, A.W. Sinev, A.E. Shokhin. A Magnetoreological Transformer Controlled by a Rotating Magnetic Field.// ISSN 1052-6188, Journal of Manufacture and Reliability, 2018, Vol. 47, №4, pp 324-329.

11. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. В 2-х т. Том 2. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004.– 532 с.

12. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – 9-е изд., стер. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 518 с.

13. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Ковригин Д.А., Синева А.В., Аббакумов Е.И. Взаимодействие силового агрегата мотора-компрессора электровоза с вибрационными полями в переходных режимах // Проблемы машиностроения и надёжности машин.- 2002.-№4.- С.105-111.

14. Гордеев, Б.А. Причины возникновения синхронизации в рельсовом транспорте / Б.А. Гордеев, А.Б. Гордеев, Д.А. Ковригин, А.В. Леонтьева // Приволжский научный журнал. – 2009. – № 4. – С. 47-53.

Сведения об авторах

Гордеев Борис Александрович, доктор техн. наук, профессор, Главный научный сотрудник Института проблем машиностроения Российской академии наук (ИПМ РАН), Россия,

603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85
Тел.: (831) 432 - 23 - 56; факс (831) 432 - 23 - 40
E-mail: gord349@mail.ru

Охулков Сергей Николаевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Виброзащита машин» ИПМ РАН; доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), Россия,

603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85
E-mail: oxulkovs@mail.ru

Осмехин Александр Николаевич, кандидат технических наук, инженер по информационным системам, Акционерное общество «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И.Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»), Россия,

603074, г. Н. Новгород, ул. Бурнаковский проезд, д. 15.
Тел.: (831) 241-87-72
E-mail: newnuclear@mail.ru

Ермолаев Артём Игоревич, младший научный сотрудник лаборатории «Виброзащита машин» ИПМ РАН, Россия,

603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85
E-mail: acidwolfvx@rambler.ru