

изложенной в [1]. Обсуждение полученных результатов планируется к опубликованию в серии последующих статей.

*Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых, договор № 14.Z56.16.5703-МК. Часть работ выполнялась при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-2683.2015.1, конкурс СП-2015). Кроме того, авторы выражают признательность за идею эксперимента профессору R. Stannarius (Institute of Experimental Physics, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Germany).*

*Список литературы*

1. A. F. Pshenichnikov, A. V. Lebedev, and M. I. Shliomis, On the rotational effect in nonuniform magnetic fluids, *Magnetohydrodynamics*, 36, 275-281 (2000).
2. A. O. Tsebers, Action of a rotating magnetic field on a ferroliquid, *Magnetohydrodynamics*, 10, 371-374 (1974).
3. C. Rinaldi, F. Gutman, X. He, A. D. Rosenthal, and M. Zahn, Torque measurements on ferrofluid cylinders in rotating magnetic fields, *J. Magn. Magn. Materials*, 289 307 (2005).
4. Yu. I. Dikanskii, O. V. Borisenko, and M. A. Bedzhanyan, Peculiarities of Motion of a Ferrofluid Drop in a Rotating Magnetic Field, *Technical Physics* 58, 475 (2013)
5. B. U. Felderhof, Entrainment by a rotating magnetic field of a ferrofluid contained in a sphere. *Phys. Rev. E* 84, 046313 (2011)
6. John T., Stannarius R. Experimental investigation of a Brownian ratchet effect in ferrofluids // *Physical Review E* 80, 050104(R) 2009.

## **ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ДИССИПАТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОЖИДКОСТНОМ ДЕМПФЕРЕ**

***О.Н. Лабкович, А.Г. Рекс, В.А. Чернобай***

*Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Республика Беларусь*

*В работе исследована возможность использования магнитожидкостного демпфера для гашения радиальных биений вращающегося вала. Показано, что увеличение объема магнитной жидкости улучшает виброзащитные характеристики демпфера. С целью увеличения рабочего интервала частот и ускорений демпфера в магнитную жидкость вводили углеродные нанотрубки.*

*Ключевые слова: магнитожидкостной демпфер, углеродные нанотрубки, гашение радиальных биений, магнитная жидкость.*

Представляют интерес виброзащитные опоры с использованием упругих свойств магнитной жидкости со свободной поверхностью в магнитном поле. Колеблющаяся поверхность, соприкасаясь с объемом магнитной жидкости, деформирует ее свободную поверхность, внутри жидкости

возникают течения, которые приводят к диссипации энергии колебаний [1,2].

Эксперимент.

Магнитожидкостный демпфер состоял из постоянных магнитов 1, закрепленных на немагнитной бронзовой втулке 2 (подшипник скольжения), вал 3 вращался и перемещался в радиальном направлении (рис.1).

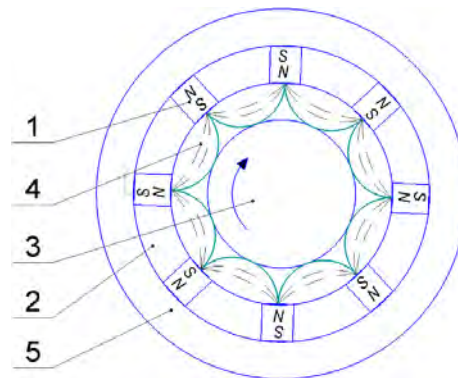


Рисунок 1 - Схема измерительного узла

Радиальные биения вала, т.е. амплитуда колебаний  $A_0$ , задавалась с помощью эксцентрика на электродвигателе вала. Постоянные магниты создавали в рабочем зазоре тангенциальное магнитное поле, которое периодически изменялось по окружности от 140 до 110 кА/м. Рабочий зазор заполнялся магнитной жидкостью 4 на основе минерального масла и магнетита, стабилизированного олеиновой кислотой, с намагниченностью насыщения 70 кА/м. Ее физические свойства при  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  и  $H = 0$  соответствовали: плотность  $\rho = 1,8 \cdot 10^3$  кг/м, динамический коэффициент вязкости  $\eta = 0,2$  Па·с, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,22$  Вт/(м·К). Виброускорения от радиальных биений вала измерялись с помощью пьезодатчика, закрепленного на корпусе вала 5. Электрический сигнал от датчика ускорения поступал через усилитель и контроллер на компьютер и обрабатывался с помощью программы АЦП NationalinstrumentAT-МЮ-64 Е. Сравнивались сигналы датчика для вариантов: 1 – вал- подшипник скольжения, 2 – вал - магнитная жидкость в рабочем зазоре – подшипник скольжения. Эффективность виброзащиты оценивалась при помощи коэффициента виброизоляции  $K_R$ , представляющего собой отношение измеряемых виброускорений с демпфером  $W_g$  и без демпфера  $W_0$ :

$$K_R = W_g/W_0$$

Условие эффективности виброзащиты по критерию  $K_R$  имеет вид:  $K_R \leq 1$ .

Исследования магнитожидкостного демпфера показали существенную зависимость коэффициента виброизоляции от амплитуды вынужденного колебания  $A_0$  (рис.2). Видно, что при достижении амплитуд вынужденных

колебаний (радиальных биений)  $0,5 \div 0,7$  мм и частотах близких к резонансным, магнитожидкостный демпфер работает не эффективно, т.е.  $K_R > 1$ .

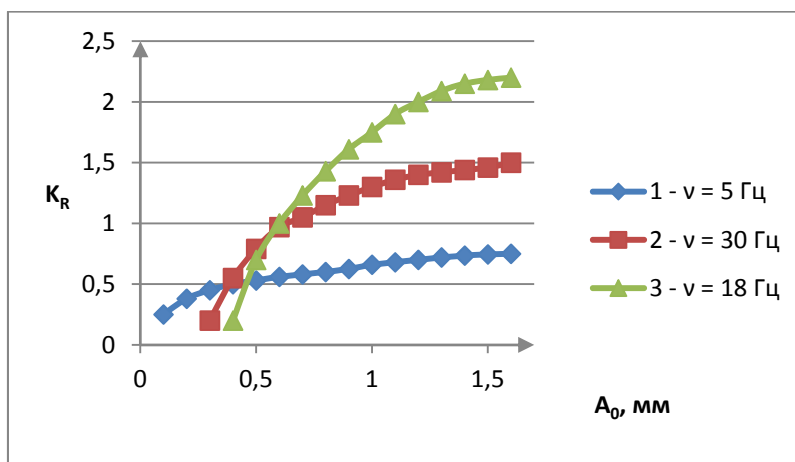


Рисунок 2 - Зависимость  $K_R$  от амплитуды

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента виброизоляции демпфера от частоты вынуждающих колебаний  $\nu$  (радиальных биений). В области резонансных частот  $\nu = 11 \div 13$  Гц  $K_R$  достигает значений 2,5, при увеличении частоты колебаний вала до 18 Гц  $K_R = 1$ . В частотном интервале  $18 \div 30$  Гц магнитожидкостной демпфер работает эффективно  $K_R < 1$  (кривая 1,2, рис.3).

Увеличение объема магнитной жидкости в зазоре с  $30 \text{ см}^2$  (кривая 1, рис. 3) до  $40 \text{ см}^2$  (кривая 2) снижает резонансные колебания  $K_R$  с 2,5 до 2,2.

Необходимо отметить, что периодическое в тангенциальном направлении магнитное поле при заполнении радиального зазора магнитной жидкостью формировало ее свободную поверхность в виде периодических стоячих волн, частично контактирующих с валом (рис.1). При вращении вала поверхностный слой магнитной жидкости увлекался во вращении, а внутри отдельного замкнутого объема периодического покрытия возникало циркуляционное течение. Радиальные колебания вала деформировали свободную поверхность магнитной жидкости, что приводило к генерации дополнительных циркуляционных течений в объеме жидкости и, как следствие, к увеличению диссипации энергии колебаний. В большем объеме магнитной жидкости интенсивность внутренних течений выше, т.е. диссипация энергии возмущений возрастает,  $K_R$  при этом снижается (рис. 3).

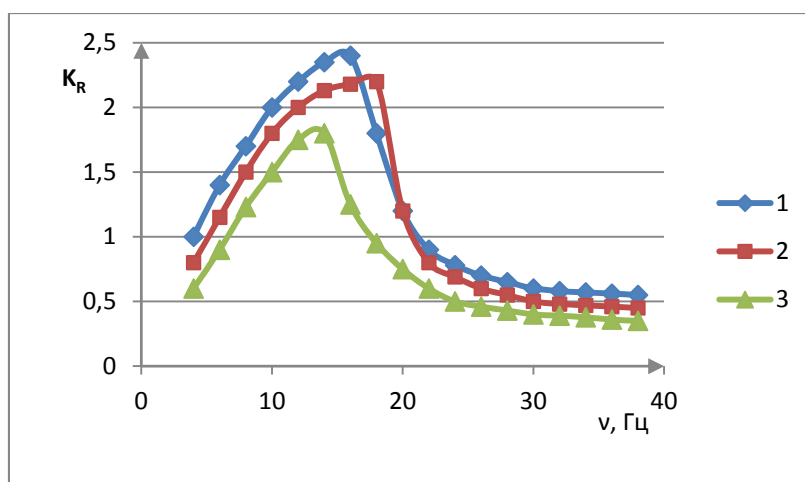


Рисунок 3 - Влияние объема магнитной жидкости и ОУНТ на  $K_R$

С целью увеличения диссипации энергии колебаний (радиальных биений) вала в магнитную жидкость вводились однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ) весовым соотношением от 0,01 % до 1 %. ОУНТ представляют собой полые цилиндры диаметром  $5 \cdot 10^{-9}$  м и длиной до  $7 \cdot 10^{-5}$  м. Однослойные углеродные нанотрубки проявляют высокую упругость при изгибе. Под действием нагрузки в направлении нормальном к продольной оси они могут изгибаться, а после снятия нагрузки восстанавливают свою форму, т.е. работают как пружина [3]. В работе [4] показано, что ОУНТ в магнитной жидкости во внешнем магнитном поле ориентированы вдоль силовых линий магнитного поля.

Как видно из рис.3 (кривая 3) при концентрации ОУНТ в магнитной жидкости 1 % во всем исследуемом интервале частот  $K_R$  снижается на 18 %.

В нашем случае, ОУНТ были в основном ориентированы в тангенциальном направлении, т.е. радиальные пульсации давлений при колебаниях вала изгибали ОУНТ, что снижало энергию колебаний.

Выводы: Добавки ОУНТ в магнитную жидкость увеличивают удельные нагрузки, расширяют интервал рабочих амплитуд и частот магнитожидкостного демпфера.

#### Список литературы

1. В.Г. Баштовой, В.С. Дашкевич, В.А. Радионов, В.А. Чернобай Экспериментальное исследование некоторых виброзащитных характеристик магнитожидкостной опоры.//Магнитная гидродинамика. – 1990. - № 3, - с.130 – 134.

2.В.Г. Баштовой, А.А. Моцар, А.Г. Рекс. Упругие свойства капли магнитной жидкости с комбинированным магнитным ядром.// Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2014. -№ 4 – с. 39 – 43.

3. Харрис П. Углеродные нанотрубки и родственные структуры. Новые материалы XXI века.//М.: Техносфера, 2003. – с. 336.

4. Лабкович О.Н. Снижение потерь на трение в куэттовском течении введением в магнитную жидкость углеродных нанотрубок. – Сборник трудов 16-ой Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям, Иваново, ИЭГУ, 2014. – с. 35 -38.

**INFLUENCE OF CARBON NANOTUBES ON DISSIPATIVE PROCESSES IN  
MAGNETIC FLUID DAMPER**

*O.N. Labkovich, V.A. Chernobay, A.G. Reks*

In the work a possibility of use of magnetic fluid damper for dampening of radial run-outs of the rotating shaft is investigated. It is shown that the increase in volume of magnetic fluid improves vibroprotective characteristics of damper. For purpose of increasing working interval of frequencies and accelerations of the damper carbon nanotubes were brought into the magnetic fluid.

**Keywords:** Magnetic fluid damper, Carbon nanotubes, Dampening of radial beats, Magnetic fluid.