

УДК 621.825

А.Н. ГУРСКИЙ

*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКОВОЙ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ МУФТЫ

*Описаны конструкции экспериментального стенда и дисковой экспериментальной муфты. Показаны схемы замеров температуры и магнитной индукции. Для проведения исследований использовались магнитореологические жидкости на основе полусинтетического и кремнийорганического масел. Приведены графики зависимости передаваемого статического и динамического момента от тока управления и рабочего зазора, возрастания температуры по времени от приложенного магнитного поля и зависимости магнитной индукции от тока управления. Отмечены увеличение статического передаваемого момента при уменьшении рабочего зазора, и увеличение динамического момента при возрастании скорости вращения ведущей части муфты.*

**Ключевые слова:** магнитореологическая жидкость, магнитореологическая муфта, магнитореологический тормоз, экспериментальный стенд, термонара, тесламетр.

### Введение

Магнитореологическая жидкость (МРЖ) – искусственно созданная среда, являющаяся взвесью ферромагнитных частичек размером 0,1... 100 мкм в жидкости-носителе, с добавлением различных комплексобразующих и стабилизирующих присадок. Основной-носителем зачастую являются синтетические, полусинтетические и силиконовые масла, вода и т.д.

Магнитореологические жидкости были разработаны еще в конце 40-х в США, однако массовое применение они получили с середины 90-х в связи с развитием электроники и смежных отраслей. На сегодняшний день области использования МРЖ разнообразны – от внедрения в исполнительных силовых узлах роботизированных систем до применения в судостроении и аэрокосмической технике [1 – 3].

Одним из перспективных направлений является применение магнитореологических жидкостей в машиностроении и станкостроении: это и быстроработывающие муфты и тормоза, и станки-гексаподы с платформой Гью-Стюарта, и адаптивная система виброконтроля и слежения при обработке точных деталей, а также полирование с помощью МРЖ [4 – 8].

Магнитореологические муфты являются комбинацией вязкостной, гидродинамической и электромагнитной порошковой муфт. Основными характеристиками данного вида сцеплений являются статическая моментная характеристика, динамическая моментная характеристика, скорость срабаты-

вания устройства (включение и выключение), температурные характеристики, электромагнитные характеристики.

Анализируя литературные источники с описанием экспериментальных исследований данных устройств, можно выделить несколько направлений. В литературе [9] описывается исследование магнитореологической муфты с коническим зазором, муфта исследовалась при больших скоростях вращения в пределах 600...2000 об/мин и была подробно описана ее температурная характеристика. В работе [10] исследовался прототип дисковой высокомоментной муфты, исследования проводились в основном на низких скоростях 30...120 об/мин.

В работах [11, 12] исследовались муфты с использованием магнитных жидкостей. Хотя данные жидкости более устойчивы чем магнитореологические, практического применения магнитожидкостные муфты не нашли из-за низких передаваемых моментов при больших массогабаритных показателях.

### 1. Постановка задачи

Прикладной и научный интерес представляет изучение зависимости передаваемого муфтой момента и ее температурных характеристик от величины рабочего зазора.

Для получения данных характеристик, дальнейшего анализа и отработки конструкций магнитореологических муфт была разработана экспериментальная конструкция дисковой муфты [13].

Муфта (рис. 1.) состоит из ведущей и ведомой

части. Ведомая часть 1 выполнена с ходовой резьбой. При вращении внутренней части относительно корпуса можно изменить рабочий зазор  $\Delta$  в пределах от 0 до 5 мм, с шагом  $0,15 \pm 0,02$  мм.

Рабочий зазор муфты заполнен магнито-реологической жидкостью. Контроль величины рабочего зазора происходит через смотровые отверстия 2, которые закрываются винтами. Жидкость удерживается в рабочем зазоре уплотнительными кольцами 3. При выключенной обмотке возбуждения ведущая часть вращается свободно и муфта не передает вращающий момент. При подводе питания к обмотке возбуждения силовые линии магнитного поля 4 (созданные обмоткой возбуждения), проходят через корпус, ведущую и ведомые части, конструктивные и рабочий зазоры. У магнито-реологической жидкости, которая находится в рабочем зазоре, повышается вязкость за счет структурирования магнитных частичек в магнитном поле, вследствие чего происходит сцепление ведущей и ведомой части муфты.

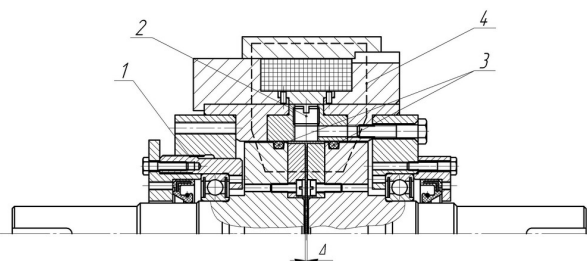


Рис. 1. Дисковая магнито-реологическая муфта с регулируемым рабочим зазором

Габаритные размеры муфты: максимальный диаметр 180 мм, длина 260 мм. Наружный диаметр рабочего диска 85 мм.

## 2. Решение задачи

Для исследования магнито-реологической муфты был спроектирован и собран экспериментальный стенд рис. 2.

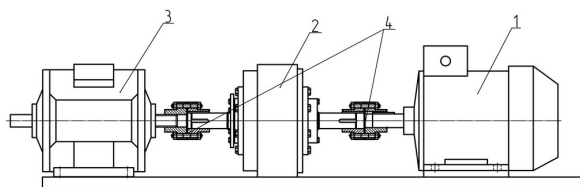


Рис. 2. Электромеханическая часть экспериментального стенда

Стенд состоит из электродвигателя 1 мощностью 2,5 кВт и частотой вращения ротора 2770 об/мин, магнито-реологической муфты 2 и нагруженного электромагнитного тормоза 3 марки ПТ 2,5-М1

производства «Завод Станкоконструкция».

Тормоз создает момент в пределах  $0 \dots 25$  Нм в диапазоне скоростей  $0 \dots 4000$  об/мин. Ведущие и ведомые валы соединены пальцевыми компенсирующими муфтами 4. Привод подключен к сети 380 В через частотный преобразователь векторного типа марки E2-8300, с помощью которого можно изменять скорость вращения двигателя в широком диапазоне от 50 до 4000 об/мин.

Исследование муфты производилось с двумя типами МРЖ на кремнийорганической основе марки ПЭС-5 и полусинтетическом масле. Средний размер магнитных частичек составлял  $1 \dots 10$  мкм, (железо карбонильное марки Р10).

На рис. 3. показана фотография экспериментального стенда. Кроме моментных характеристик снимались также температурные и электромагнитные показания. Схемы замеров температуры и магнитной индукции в рабочем зазоре приведены на рис. 4.

Измерения индукции проводились тесламетром марки Ф4354/1. Температура замерялась хромель-копелевой термопарой на мультиметре марки DT9208A.

Статические испытания заключались в замере максимального момента на срыв при неподвижных относительно друг друга ведущей и ведомой части муфты. Испытания происходили при величинах рабочего зазора в диапазоне  $0,5 \dots 2$  мм с шагом 0,5 мм. Обмотка возбуждения, которая используется в муфте, состоит из 370 витков, диаметр проволоки 1 мм. На рис. 5. показан график зависимости индукции электромагнитного поля от тока в обмотке возбуждения для величины зазора 1 мм.

Как видно из графика, индукция магнитного поля прямо пропорциональна приложенному току в обмотке возбуждения. Соответственно, передаваемый момент прямо пропорционально зависит от характеристик используемой магнито-реологической жидкости.

Температурная характеристика муфты (рис. 6) исследовалась для двух режимов при неподвижном ведомом валу. Скорость ведущего вала 500 об/мин. Исследования проводились при отключенной обмотке возбуждения и при токе питания 1 А. Как видно из графиков, при полном холостом ходе температура установившегося режима  $29$  °С, причем выход на режим около 20 минут. При подключении питания в обмотке возбуждения в зазоре индукция магнитного поля порядка 0,17 Тл. Величина температуры установившегося режима  $45$  °С.

Статические характеристики муфты показаны на рис. 7. Как следует из графиков, статический момент возрастает при уменьшении рабочего зазора.

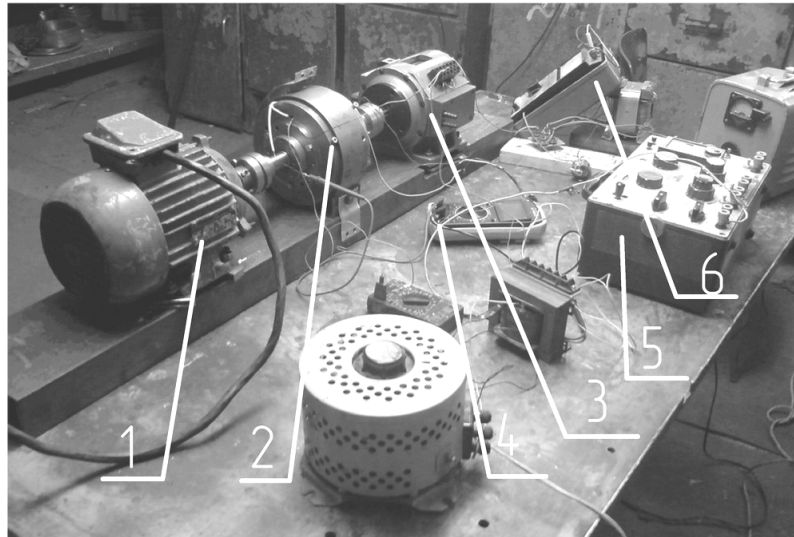


Рис. 3. Фотография экспериментального стенда:  
 1 – электродвигатель; 2 – магнитоэологическая муфта; 3 – электромагнитный тормоз;  
 4 – мультиметр; 5,6 – амперметры

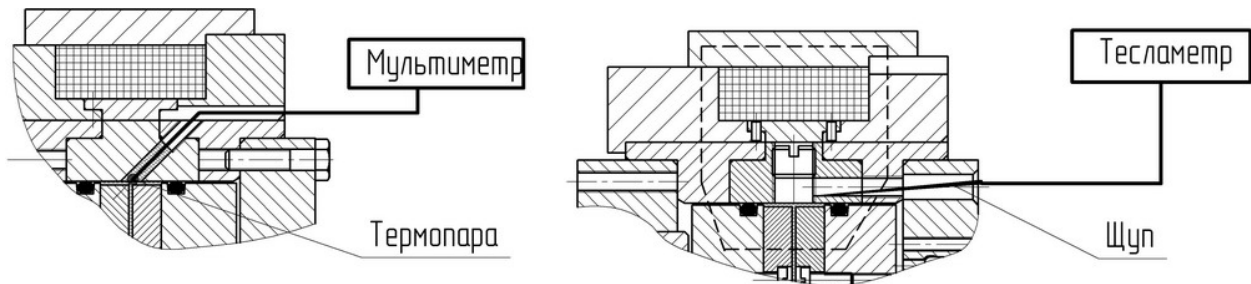


Рис. 4. Схемы замеров температуры (слева) и магнитной индукции (справа)

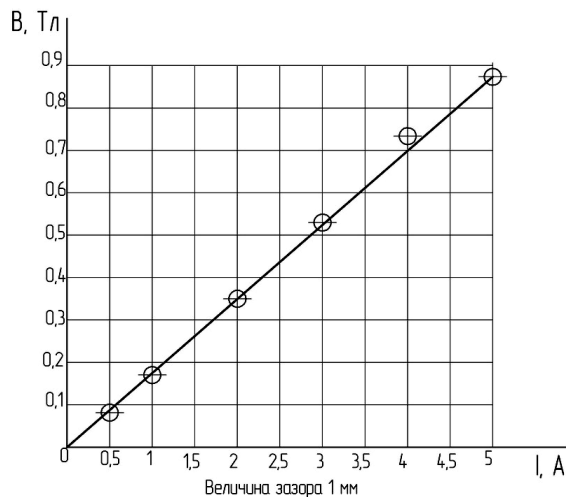


Рис. 5. Зависимость магнитной индукции от тока в обмотке возбуждения

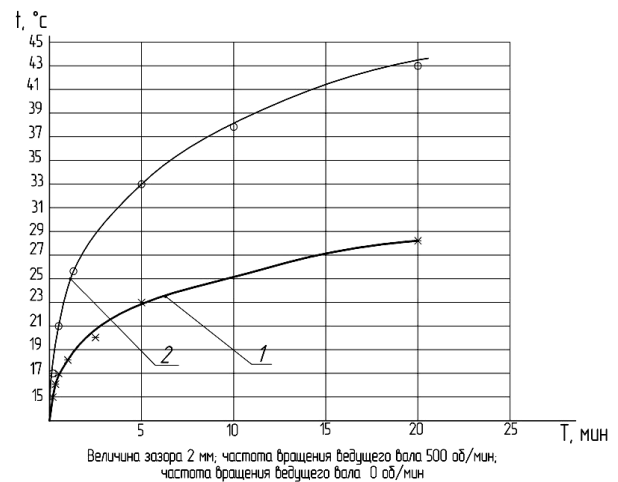


Рис. 6. Рост температуры по времени  
 1 – при выключенном питании обмотки возбуждения; 2 – ток в обмотке возбуждения 1 А

Максимальный статический момент равен 8...8,5 Н·м для зазора 0,5 мм. Это объясняется тем, что при уменьшении зазора, уменьшаются потери магнитного поля в электромагнитной цепи, из-за чего возрастает значение величины магнитной ин-

дукции в рабочем зазоре, и, соответственно, напряжение сдвига в МРЖ.

Следует также отметить возрастание величины холостого момента при уменьшении величины рабочего зазора.

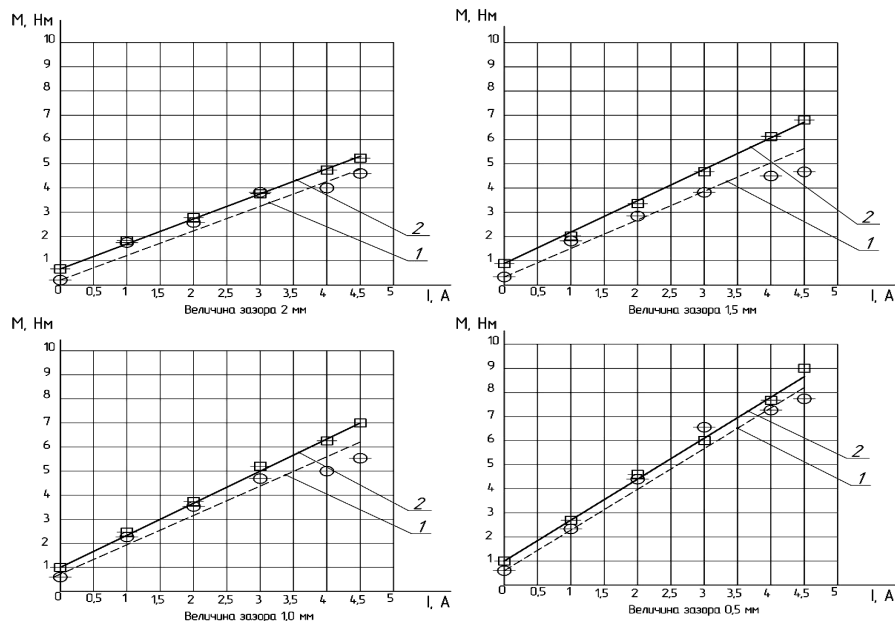


Рис. 7. Зависимость статического момента от тока в обмотке возбуждения для различных рабочих зазоров: 1 – МРЖ на полусинтетическом масле; 2 – МРЖ на кремнийорганическом масле

На рис. 8 представлена динамическая характеристика магнитоореологической муфты.

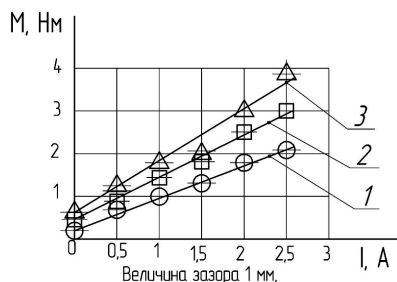


Рис. 8. Зависимость динамического передаваемого момента от тока в обмотке возбуждения: 1 – частота вращения 300 об/мин; 2 – частота вращения 500 об/мин; 3 – частота вращения 750 об/мин

Как следует из графиков, динамический момент возрастает с увеличением скорости. Это обусловлено тем, что при передаче вращения в динамике, возникает вязкостная составляющая момента, которая зависит от скорости вращения и величины рабочего зазора [9].

### Выводы

В данной работе был произведен анализ экспериментальных данных для дисковой магнитоореологической муфты. Были показаны статические и динамические характеристики. Эксперименты показали, что магнитоореологическая муфта способна передавать достаточно высокие управляемые крутящие моменты.

На основе полученных данных ведутся разработки высокомоментной многодисковой муфты в

паре с планетарным редуктором для использования в шарнирных узлах роботизированных систем, а также тормозов для поворотных устройств судов.

В дальнейшем следует провести исследования: для рабочих зазоров в диапазоне 0,1...5 мм, скорости срабатывания (включения – выключения) муфты, более детальные исследования динамических характеристик для различных величин зазоров и скоростей вращения, а также провести испытания муфты в режиме тормоза (при неподвижном ведомом валу).

Учитывая особенность конструкции, нужно принять во внимание недостаточно эффективную работу уплотнительных колец при скоростях свыше 800 об/мин, при повышенных скоростях происходит относительно быстрое стирание колец. Из-за увеличенных центробежных сил происходит динамический вынос МРЖ из рабочей зоны.

Для испытания при повышенных скоростях разработан и изготовлен уплотнительный узел с применением манжетных уплотнений, которые хорошо зарекомендовали себя на практике. С данным узлом дальнейшие испытания будут проводиться на повышенных скоростях порядка 800...2000 об/мин.

### Литература

1. Patent Number 0046242 A1 USA B63H 25/02, Arrangement and method for controlling a propeller drive on a boat / Lars Bremsjo, Dan Olsson, Stig Ursing / AB Volvo Penta – №11/553404; filed 26.10.2006; pub. date 1.03.2007.
2. Jedryczka C. Coupled phenomena analysis of differential MRF device for torque transmission / C. Jedry-

- czka // X International PhD Workshop OWD'2008. – Poznan, 2008. – P. 413-418.
3. Mikulowski G. Adaptive aircraft shock absorbers / G. Mikulowski, J. Holnicki-szulcmas // Workshop on Smart Materials and Structures SMART'03. – Jadwisin, 2003. – P. 71-80.
4. Инф. сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа к документу: [www.smartmachiningsystems.com/Papers/P30\\_NIST\\_adaptronic\\_chatter\\_damping\\_system\\_rew.pdf](http://www.smartmachiningsystems.com/Papers/P30_NIST_adaptronic_chatter_damping_system_rew.pdf). – 2.05.2008.
5. Инф. сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа к документу: [www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/spanende\\_fertigung/articles](http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/spanende_fertigung/articles).
6. Инф. сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа к документу: [www.isf.de/veroeff/abstracts/2007/adaptronic\\_chatter\\_damping\\_695.pdf](http://www.isf.de/veroeff/abstracts/2007/adaptronic_chatter_damping_695.pdf). – 2.05.2008.
7. Steward platform. Application of smart fluid dampers in this field / A. Boltosi, A. Chiriac, R. Nagy, L. Bereteu // Fascicle of Management and Technological Engineering. – 2008. – Volume VII (XVII). – P. 107-114.
8. Unsal M. Vibration Control of Parallel Platforms based on Magnetorheological Damping / M. Unsal, C.D. Crane, C. Niezrecki // Florida Conference on Recent Advances in Robotics, FCRAR – 2006. – 2006. – P. 1-6.
9. Lampe D. Untersuchungen zum Einsatz von magnetorheologischen Fluiden in Kupplungen / D. Lampe // Dissertation, Technischen Universität. – Dresden, 2000. – P. 11-15.
10. A High-Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch / B. Kavlicoglu, F. Gordaninejad, C.A. Cobanoglu, N. Evrensel, M. Xin, C. Heine, A. Fuchs, G. Korol // Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures. – San Diego, March 2002. – Vol. 4697. – P. 37-41.
11. Сизов А.П. Разработка и исследование магнитоожидкостных муфт / А.П. Сизов, Ю.И. Малков // Магнитные жидкости: научные и прикладные исследования: сб. науч. тр. – Минск, 1983. – С. 103-113.
12. Магнитные жидкости в машиностроении: монография / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин и др. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
13. Пат. 37799 UA МПК F16D 37/00 (2008) Магнітореологічна муфта / Соловійов С.М., Гурський А.М.; Заявник Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. – № и200808480; заявл. 25.06.2008; опубл. 10.12.2006. Бюл. № 232008.

Поступила в редакцию 01.06.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры турбин С.И. Сербин, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКОВОЇ МАГНІТОРЕОЛОГІЧНОЇ МУФТИ

*А.М. Гурський*

Описані конструкції експериментального стенда й дискової експериментальної муфти. Показані схеми замірів температури й магнітної індукції. Для проведення досліджень використовувалися магнито­реологічні рідини на основі напівсинтетичного й кремнійорганічного масел. Наведені графіків залежності переданого статичного й динамічного моменту від струму керування й робочого зазору, зростання температури за часом від прикладеного магнітного поля й залежності магнітної індукції від струму керування. Відзначено збільшення статичного переданого моменту при зменшенні робочого зазору, і збільшення динамічного моменту при зростанні швидкості обертання ведучої частини муфти.

**Ключові слова:** магнито­реологічна рідина, магнито­реологічна муфта, магнито­реологічне гальмо, експериментальний стенд, термопара, теслометр.

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE MAGNETORHEOLOGICAL DISK CLUTCH

*A.M. Gurskyi*

Constructions of the experimental setup and disk experimental clutch are described. Scheme of measurement of temperature and a magnetic induction are displayed. For holding of researches were used magnetorheological fluids on the basis of semi-synthetic and silicon oils. Graphs of dependence of the transmitted static and dynamic moment from a current of control and an operating clearance, temperature increase on time from the affixed magnetic field and dependence of a magnetic induction on a control current are given. Are marked increases in the static transmitted moment at operating clearance reduction, and increase in the dynamic moment at increase of speed of rotation of a leading part of a clutch.

**Keywords:** magnetorheological fluid, magnetorheological clutch, magnetorheological brake, experimental setup, thermocouple, teslameter.

**Гурський Андрей Николаевич** – аспирант кафедри технологія судового машиностроєння Національного університету кораблестроєння ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: andriy.gur@gmail.com.