

УДК 621.825

С.Н. СОЛОВЬЕВ, А.Н. ГУРСКИЙ

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина***ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМИ СРЕДАМИ**

Рассмотрены и проанализированы перспективные направления использования исполнительных органов мехатронных систем с магнитореологическими жидкостями (МРЖ). Приведены рабочие характеристики для некоторых зарубежных коммерческих МРЖ. Предложены алгоритм и методы решения задач при проектировании данного вида механизмов. Рассмотрены конструкции и приведены рабочие характеристики экспериментальной дисковой и цилиндрической магнитореологической муфты. Приведены диаграммы распределения электромагнитных полей в экспериментальных магнитореологических муфтах.

Ключевые слова: магнитореологическая жидкость, магнитореологическая муфта, магнитореологический тормоз, метод конечных элементов, мехатронная система.

Введение

Современное развитие компьютерных технологий и интегрирование их в различные машины и механизмы с каждым годом возрастает. В таких наукоемких областях, как авиакосмическая промышленность, автомобилестроение, судовое и общее машиностроение, станкостроение и роботизированные системы вкладываются многомиллионные инвестиции в новые разработки и усовершенствование существующих. Происходит усложнение мехатронных систем, все большее слияние электроники (микроконтроллеры, программное обеспечение) и систем с механическими исполнительными органами. Соответственно возникает необходимость в механизмах и силовых узлах, имеющих возможность управления с помощью электроники.

Перспективными являются механизмы с электромагнитной связью, в которых используется маг-

нитореологическая жидкость (МРЖ) (магнитореологические муфты, тормоза, демпферы).

Магнитореологические муфты являются комбинацией вязкостной, гидродинамической и электромагнитной порошковой муфт. Данные муфты нашли наибольшее применение в автомобилестроительной промышленности в качестве муфт сцепления, привода вентилятора, а также как муфты блокирующего дифференциала [1-4].

В станкостроении магнитореологические муфты применяются в коробках передач и коробках подач в качестве муфт сцепления, а также в качестве предохранительных муфт в адаптивных системах слежения [5].

Ведутся разработки магнитореологических муфт и тормозов, применяемых в электродвигателях, автомобилях, а также в судостроении [6-8].

Примеры мехатронных систем с использованием магнитореологических муфт показаны на рис 1.

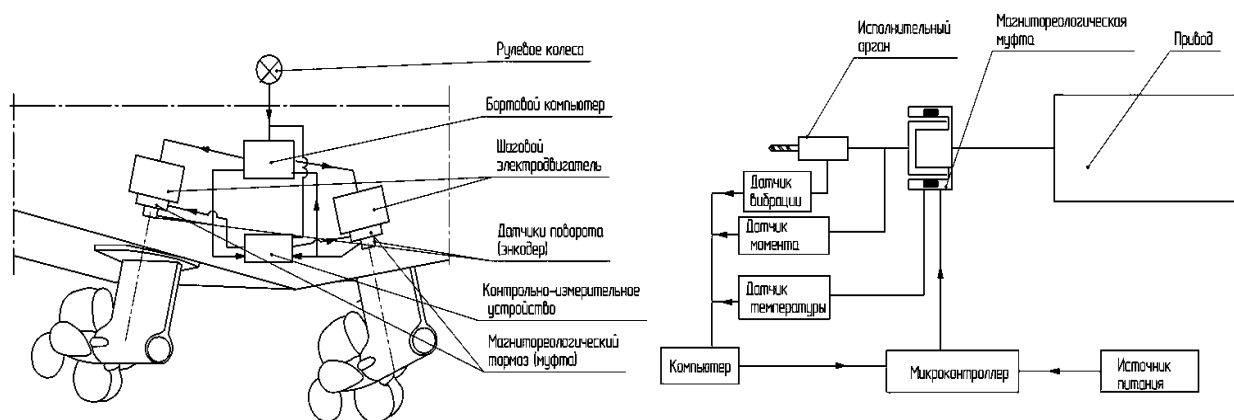


Рис. 1. Мехатронная система с использованием магнитореологической муфты и средств активного контроля и управления

За рубежом ведутся опытно-конструкторские и технологические работы по внедрению магнитореологических демпферов в автомобилестроении [9, 10].

1. Постановка задачи

Основным направлением использования магнитореологической жидкости являются электромагнитные механизмы, соответственно одним из важных критериев в проектировании и в работе являются электромагнитные характеристики конструкции (оптимальное распределение магнитного поля, минимальные потери на рассеяние, и, соответственно, увеличение КПД обмотки возбуждения). Важными также являются гидродинамические характеристики магнитореологической жидкости и поведение ее при наложении магнитного поля.

Магнитореологическая жидкость, имеет определенный предел текучести и вязкость, и в обычных условиях ведет себя как ньютоновская жидкость.

Когда к жидкости приложено внешнее магнитное поле, предел текучести жидкости увеличивается, и она начинает вести себя как реологическое тело Бингама-Шведова, при этом возникают специфические эффекты, которые следует учитывать при проектировании (рис. 2) [11, 12].

$$\tau = \pm \tau_0 + \mu \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (1)$$

где τ_0 – предел текучести магнитореологической жидкости зависящий от приложенного магнитного поля;

μ – вязкость магнитореологической жидкости;

$\frac{\partial u}{\partial y}$ – угловая скорость сдвига (градиент скорости).

Целью настоящей работы является изучение и учет этих особенностей при проектировании исполнительных органов мехатронных систем с магнитореологическими средами.

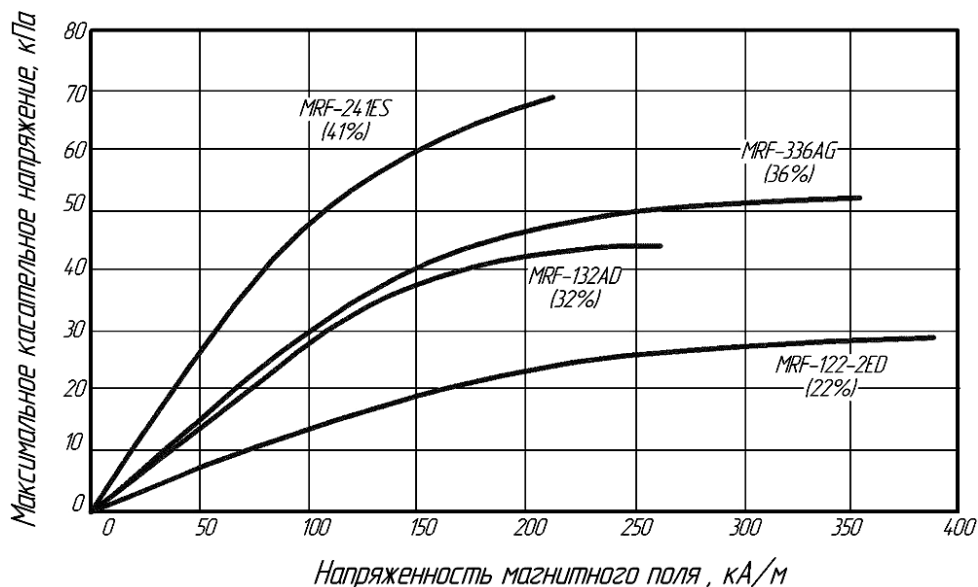


Рис. 2. Зависимость максимального касательного напряжения от напряженности приложенного магнитного поля, для некоторых коммерческих жидкостей корпорации LORD [13]

2. Решение задачи

При проектировании задаются требования к готовому изделию (передаваемая мощность, скорость срабатывания и т.д.), разработчик также имеет характеристики применяемой магнитореологической жидкости. Наиболее трудоемкими являются задачи рационального распределения магнитного поля в конструкции при сведении к минимуму потерь на рассеяние, уменьшение металлоемкости изделия и материальных затрат. Данные задачи можно частично решить путем применения пакетов прикладных программ, реализующих метод конечных элементов. Алгоритм проектирования приведен на рис. 3.

Передаваемый муфтой момент зависит от характеристик жидкости, величины магнитного поля, геометрических характеристик (площади рабочего зазора).

При цилиндрической компоновке муфты площадь рабочего зазора S :

$$S = 2\pi \cdot \sum_{i=1}^n (R_i l_i), \quad (2)$$

где n – количество зазоров;

R_i – радиус i -го зазора;

l_i – длина i -го зазора.

Для дисковой компоновки муфты площадь рабочего зазора S :

$$S = \pi \cdot \sum_1^n (R_i^2), \quad (3)$$

где n – количество зазоров;

R_i – радиус i -го зазора.

Расчет геометрических характеристик ведется при подстановке максимального момента (муфта работает в синхронном режиме), остальные величины передаваемых моментов (динамического и холостого хода) определяются после финальной компоновки муфты.

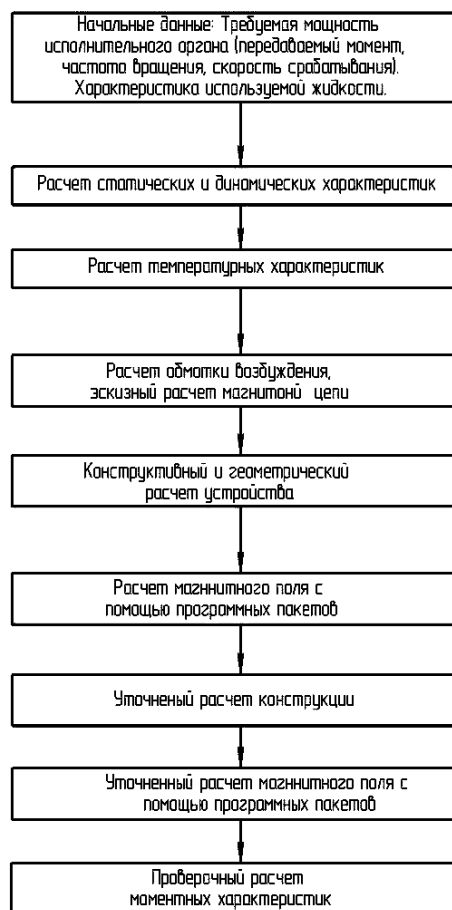


Рис. 3. Алгоритм проектирования электромеханических устройств

В зависимости от критичности геометрических параметров (длина или диаметр) для цилиндрической однозорной муфты:

$$l_{\max} = \frac{M_{\max.стат}}{2 \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot R^2}, \quad (4)$$

где l_{\max} – максимальная длина рабочего зазора; $M_{\max.стат}$ – максимальный передаваемый момент при синхронном вращении ведущей и ведомой частей; R – радиус передаваемого момента.

При определении радиуса рабочего зазора:

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{M_{\max.стат}}{2 \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot l}}, \quad (5)$$

где R_{\max} – максимальнодопустимый радиус рабочего зазора;

l – длина рабочего зазора.

Для дисковой однозорной муфты:

$$R_{\max} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot M_{\max.стат}}{\tau_0 \cdot \pi}}. \quad (6)$$

Если конструктору не даны ограничения по длине или диаметру, следует выполнить общую оптимизацию системы.

Подставив соответствующие значения, можно получить передаваемые моменты в режиме скольжения и в режиме холостого хода.

Динамический момент в режиме скольжения для цилиндрической муфты:

$$M_{\text{динам.}} = 2\pi \cdot l_{\max} \left(\tau_0 R_i^2 + \frac{\mu(\omega_2 - \omega_1)}{4\delta} R_i^3 \right), \quad (7)$$

где ω_1 – угловая скорость ведомого вала;

ω_2 – угловая скорость ведущего вала;

δ – толщина рабочего зазора.

Динамический момент в режиме скольжения для дисковой муфты:

$$M_{\text{динам.}} = 2\pi \left(\frac{\tau_0}{3} R_i^3 + \frac{\mu(\omega_2 - \omega_1)}{4\delta} R_i^4 \right). \quad (8)$$

Момент холостого хода в магнитоэологической муфте без приложенного магнитного поля для цилиндрической компоновки муфты:

$$M_{\text{хол.хода}} = 2 \frac{\pi\mu(\omega_2 - \omega_1)}{\delta} l_{\max} R_i^3. \quad (9)$$

Момент холостого хода в магнитоэологической муфте без приложенного магнитного поля для дисковой компоновки муфты:

$$M_{\text{хол.хода}} = \frac{\pi\mu(\omega_2 - \omega_1)}{2\delta} R_i^4. \quad (10)$$

При расчете момента холостого хода важно учитывать также особенность конструкции. Наличие дополнительных контактных уплотнений (уплотнительных колец, манжетных уплотнений) создает дополнительный остаточный момент.

На рис. 4 показаны твердотельные модели экспериментальных муфт. Двухзорная цилиндрическая муфта состоит из ведущей части, в которой находится обмотка возбуждения, и малоинерционной ведомой части [14,15]. Конструкция выполнена с вращающейся обмоткой возбуждения, поэтому на ведомом валу муфты смонтированы контактные кольца, к которым подведено щеточное устройство. В торце ведущей части сделаны смотровые отверстия для заправки магнитоэологической жидкостью, а также контроля рабочего зазора, наличия или отсутствия перекоса после сборки. Максимальный передаваемый муфтой момент 50 Н×м.

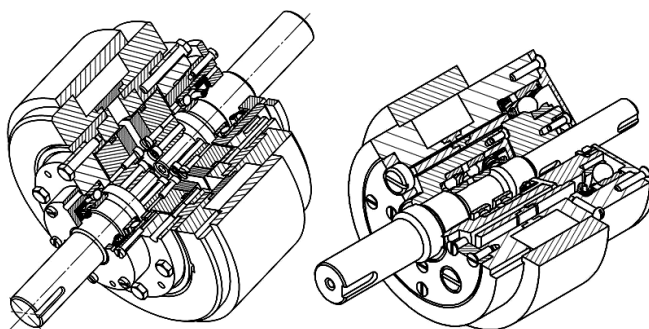


Рис. 4. Твёрдотельные модели магнитореологических муфт цилиндрическая (справа) и дисковая с регулируемым рабочим зазором (слева)

Особенностями дисковой муфты [16] являются повышенная ремонтпригодность, возможность испытания, как с обмоткой возбуждения, так и с постоянными магнитами. Ведомая часть имеет ходовую резьбу, позволяющую изменять рабочий зазор в

пределах 0...5 мм, с шагом 0,15 мм. В зависимости от тока в обмотке возбуждения максимальный передаваемый муфтой момент находится в пределах 0...7 Н×м.

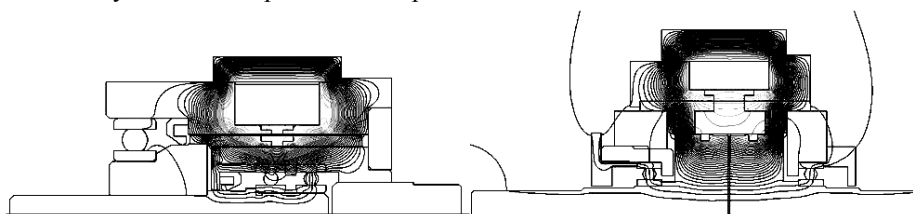


Рис. 5. Распределение магнитного поля в цилиндрической магнитореологической муфте (слева) и в дисковой магнитореологической муфте (справа)

На рис. 5 показано распределение силовых линий магнитного поля в магнитореологических муфтах. Путем рационального выбора материалов удалось организовать магнитные потоки в рабочих зазорах муфт с минимальными потерями на рассеяние.

При проектировании определение индукции или напряженности магнитного поля в нужной точке аналитическим путем затруднительно, поэтому программные пакеты, реализующие метод конечных элементов, в данном случае позволяют решить такого рода задачи в достаточно сжатые сроки.

Выводы

В данной работе приведен алгоритм расчета и проектирования исполнительных органов мехатронных систем с магнитореологическими средами. С помощью моделирования была окончательно оптимизирована магнитная система и выбраны материалы рабочих деталей.

Приведены реальные конструкции электромагнитных муфт с магнитореологическими средами.

Следует отметить, что, в отечественной литературе вопрос проектирования магнитореологических муфт, конкретные методики расчета, анализа и оптимизации данных магнитных систем ос-

вещены недостаточно.

Литература

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: WWW.URL: <http://web.me.unr.edu/ciml/posters.html>. – 13.04.2009.
2. Terzo Mario Sviluppo di un differenziale semiattivo a fluido magnetoreologico // PhD thesis – Università degli Studi di Napoli Federico II. // 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: WWW.URL: <http://www.fedoa.unina.it/2058/>. – 13.04.2009.
3. Patent Number 2007/0191172 A1 USA F16H 48/06. Externally fctuated torque coupling for drivetrain / Jun Yoshioke – № 11/354078; field 15.02.2006; pub. date 16.08.2007.
4. Patent Number 6,183,386 B1 USA F16H 37/06, Differential containing rheological fluid / James A. Dugga; assignee – Dana corporation. – №08/775045; field 27.11.1996; pub. date 6.02.2001.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: WWW.URL: www.isf.de/veroeff/abstracts/2007/adaptronic_chatter_damping_695.pdf – 15.04.2009.
6. Patent Number 0074196 A1 USA F16F 9/53, Automobile brake device / Il Rae Park - №10/012343; field 12.12.2001; pub. date 20.06.2002.
7. Park Edward J. A performance evaluation of

an automotive magnetorheological brake design with a sliding mode controller / Edward J. Park, Dilian Stoi-kov, Luis Falcao da Luz, Afzal Suleman // Mechatronics. – 2006. – vol.16, № 7. – P. 405-416.

8. *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.*

9. *Shen Yongjun. Semi-active control of hunting motion of locomotive based on magnetorheological damper / Yongjun Shen, Shaopu Yang, Cunzhi Pan and Haijun Xing // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – 2006. – Vol.2, №2. – P. 323-329.*

10. *Sapinski B. Real-time controllers for MR seat damper / B. Sapinski, M. Rosol // AMAS Workshop on Smart Materials and Structures SMART'03. – 2003. – P. 181-194.*

11. *Сизов А.П. Разработка и исследование магнитоэластических муфт / А.П. Сизов, Ю.И. Малков // Магнитные жидкости: научные и прикладные исследования. сб. науч. тр. – Минск, 1983. – С. 103-113.*

12. *Kavlicoglu B. A High-Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch / B. Kavlicoglu,*

F. Gordaninejad, C.A. Evrensel, N. Cobanoglu, M. Xin, C. Heine, A. Fuchs, G. Korol // Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures. – San Diego. – Vol4697, March 2002.

13. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: WWW.URL:<http://www.lord.com/> – 15.04.2009.

14. *Пат. 16582 UA МПК F16D 37/00 (2006) H02K 49/00 (2006) Електромагнітна безконтактна муфта / Соловйов С.М., Виноградів О.М., Гурський А.М.; Заявник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № u200601760; заявл. 20.02.2006; опубл. 15.08.2006, Бюл.№8 2006.*

15. *Соловьев С.Н. Улучшение рабочих характеристик электромагнитных муфт / С.Н. Соловьев, А.Н. Гурский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 8. – С. 75-77.*

16. *Пат. 37799 UA МПК F16D 37/00 (2008) Магніторологічна муфта / Соловйов С.М., Гурський А.М.; Заявник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № u200808480; заявл. 25.06.2008; опубл. 10.12.2006, Бюл.№232008.*

Поступила в редакцию 1.06.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., ректор ЧГУ Л.П. Клименко, Черноморский государственный университет им. Петра Могилы, Николаев, Украина.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ З МАГНІТОРЕОЛОГІЧНИМИ СЕРЕДОВИЩАМИ

С.М. Соловйов, А.М. Гурський

Розглянуті і проаналізовані перспективні напрямки використання виконавчих органів мехатронних систем з магніторологічними рідинами (МРР). Наведено робочі характеристики для деяких закордонних комерційних МРР. Запропоновано алгоритм і методи рішення завдань при проектуванні даного виду механізмів. Розглянуто конструкції й наведені робочі характеристики експериментальної дискової й циліндричної магніторологічної муфти. Наведено діаграми розподілу електромагнітних полів в експериментальних магніторологічних муфтах.

Ключові слова: магніторологічна рідина, магніторологічна муфта, магніторологічне гальмо, метод кінцевих елементів, мехатронна система.

FEATURES OF DESIGN OF MECHATRONIC SYSTEMS WITH MAGNETORHEOLOGICAL MEDIUM

S.M. Solovjev, A.M. Gurskyi

Perspective directions of use of executive powers mechatronic systems with magnetorheological fluids (MRF) are considered and analysed. Operating characteristics for some foreign commercial MRF are given. The algorithm and problem solving methods are offered at projection of the given aspect of mechanisms. Constructions are considered and operating characteristics experimental disk and cylindrical magnetorheological clutches are presented. Diagram of distribution of electromagnetic fields in experimental magnetorheological clutches are given.

Key words: magnetorheological fluid, magnetorheological clutch, magnetorheological brake, finite element analysis, mechatronic systems.

Соловьев Станислав Николаевич – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии судового машиностроения Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина.

Гурський Андрей Николаевич – аспирант кафедры технологии судового машиностроения Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andriy.gur@gmail.com.