

УДК 543.271, 533.5.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Мария Сергеевна Мосина

Студент 5 курса,

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.М. Базиненков,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Аннотация

В настоящее время создано огромное количество устройств перемещения. Однако каждый механизм имеет свои достоинства и недостатки, и поэтому перед инженерами каждый раз стоит проблема выбора того или иного наиболее подходящего привода. Просматривается некоторая зависимость: точнее привод, тем меньше нагрузочная способность. Появившиеся гидравлические привода на основе магнитореологической жидкости позволили объединить в себе и то, и другое.

В данной работе представлено исследование точности трехкоординатного магнитореологического привода на основе гидростатической опоры. Проведен анализ формулы для определения общей погрешности привода. Представлены результаты экспериментов по изучению тока трогания МРЖ и деформации вакуумного сильфона на поперечный изгиб.

Введение

В связи с тенденцией современной технической области к уменьшению размеров компонентов, повышаются требования к используемому технологическому оборудованию, необходимого для перемещения и позиционирования элементов с повышенной точностью. К таким областям относятся, к примеру, микролитография, электронная микроскопия и др.

Для определения точности механизма используется формула общей погрешности привода, которая складывается из нескольких составляющих. Для повышения точности перемещения необходимо устранить влияния максимально большего количества слагаемых на исходную величину.

Механизмы перемещений

Существуют различные классификации механизмов перемещений. По принципу преобразования разных видов энергии в кинетическую энергию перемещения рабочего тела, приводы можно разделить на несколько основных групп [1]:

1. Тепловой механизм – преобразует тепловую энергию в кинетическую.

Перемещение осуществляется за счет изменения размеров материала, которое происходит при изменении температуры. Термомеханические системы используют физическое расширение или сжатие, которое происходит в материалах, когда изменяется их температура в их первоначальной фазе (изменения агрегатного состояния не происходит).

Достоинства: компактный размер, рабочий ход, система управления, точность

Недостатки: необходимость нагрузки, быстродействие

2. Электрический механизм - преобразует энергию электромагнитного поля в кинетическую энергию исполнительного механизма.

К данному типу относится пьезоэлектрический механизм. Перемещения возникают из-за размерных изменений, возникающих в отдельных кристаллических материалах (пьезоэлектриках) при воздействии электрического поля или электрического заряда. Этот эффект носит название обратного пьезоэлектрического. Типичный пьезоэлектрический материал - кварц (SiO_2).

Достоинства: компактный размер, точность

Недостатки: низкая нагрузочная способность, рабочий ход

3. Гидравлический механизм – совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством гидравлической энергии, энергии сжатой жидкости (в подавляющем большинстве механизмов, масла).

Достоинства: рабочий ход, нагрузочная способность

Недостатки: точность, громоздкость, необходимость гидравлической системы

4. Пневматический механизм – совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством энергии сжатого газа. Обязательным элементом пневматического привода являются компрессор (генератор пневматической энергии) и пневмодвигатель.

Достоинства: простота конструкции, дешевизна, рабочий ход

Недостатки: точность, необходимость пневмосистемы

Таблица 1. Анализ характеристик приводов

Характеристика	Тип механизма			
	Тепловой [2]	Пневматический [3]	Гидравлический [4]	Пневматический [5]
Рабочие температуры, °С	1,1...148,9	20...+50	20... +80	0...+60
Рабочий ход, мм	22,6...63,5	50	500	2000
Максимальная нагрузка, кг	До 100	До 10	До 100	До 10
Погрешность, мм	До 10	0,05-10	100	1000

Гидравлические механизмы с магнитореологическим управлением

В настоящее время очень перспективными материалами являются материалы с управляемыми реологическими свойствами. Реология – наука о течении и свойствах вязких сред, проявляющих одновременно несколько фундаментальных свойств, вязкость, упругость, пластичность, прочность и т.д., в условиях воздействия на них сдвиговых, магнитных, электрических, тепловых, гравитационных и других полей [5]. К таким материалам относятся магнитореологические и электрореологические жидкости и эластомеры, а также феррожидкости.

Магнитореологические (МР) жидкости представляют собой суспензии магнитных частиц (восстановленное железо, чистое железо, кобальт, карбонильное железо, никель) размером порядка 1...20 мкм в жидкости-носителе. Носителем могут выступать различные жидкости, в зависимости от назначения устройства это могут быть: вода, кремнийорганическая (силиконовая) жидкость, синтетические и полусинтетические масла, минеральные масла и т.д. Под действием магнитного поля частицы, распределенные в объеме дисперсионной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля (МР-эффект) (рис. 4). При этом магнитное взаимодействие между частицами приводит к значительному изменению реологических свойств, поскольку образованные структуры препятствуют свободному перемещению суспензии и вызывают увеличение вязкости жидкости более чем в 100000 раз, что зависит от материала частиц дисперсной фазы, дисперсионной среды, размеров частиц и их объемной концентрации, а также других параметров. Благодаря этому эффекту МР жидкости получили широкое распространение в полупассивных демпфирующих устройствах, тормозных системах и жидкостных захватах.



Рис. 4. МР-эффект: а – в присутствии магнитного поля H , б – без внешнего поля

Магнитореологический дроссель (МРД) предназначен для регулирования потока жидкости и выполняет роль клапана. Конструкция позволяет уменьшить потери давления из-за отсутствия движущихся и трущихся инерционных частей как в других типах клапанов. Схема МРД показана на рис. 5.

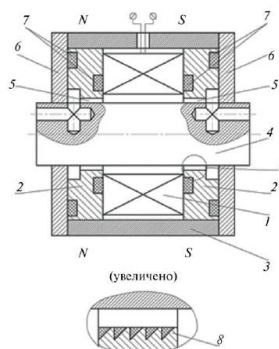


Рис. 5. Схема МРД

1 — электромагнитная катушка; 2 — кольца; 3 — втулка; 4 — сердечник; 5 — рабочий зазор; 6 — фиксирующие кольца; 7 — уплотнительные кольца; 8 — концентраторы напряженности магнитного поля

Данный элемент позволяет использовать очень полезное свойство магнитореологической жидкости - магнитореологический эффект, принцип действия которого представлен на рис. 6. При протекании МР жидкости через рабочий зазор дросселя, показанный на рис. 5, в отсутствии магнитного поля жидкость свободно протекает, но как только на катушку подается напряжение, магнитные частички начинают выстраиваться вдоль силовых линий поля, образуя твердую структуру на вершинах зуба, где концентрация магнитного поля наибольшая. Образовавшаяся твердая структура мешает протеканию жидкости. При достижении некоторого значения $B_{\max}$ жидкость не протекает совсем. Дроссель закрыт. Изменяя величину управляющего сигнала, подаваемого на МР дроссели, можно регулировать давление рабочей среды в камерах высокого давления и перемещать каретку по трем координатам X, Y, Z . Линейные перемещения каретки по осям X и Y преобразуются в угловые смещения сегмента вокруг упругого шарнира.

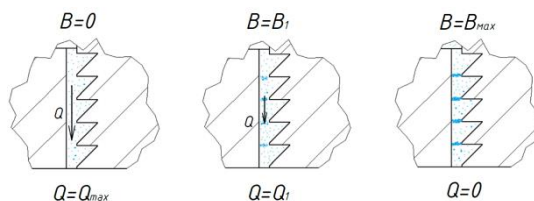
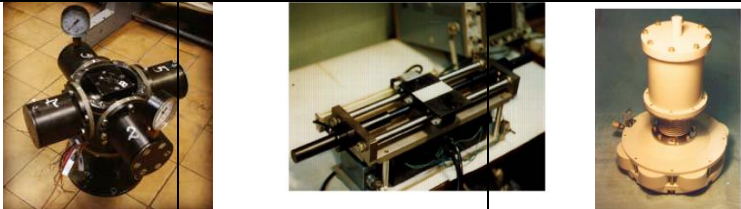


Рис. 6. — Принцип действия МР дросселя

В МГТУ имени Н.Э. Баумана на кафедре МТ-11 разрабатываются механизмы точных перемещений и активной виброизоляции на основе указанных материалов.

Таблица 2 Сравнение магнитореологических приводов

Технические характеристики	МР привод с сильфонной герметизацией	Однокоординатный привод	МР привод на основе гидростатической опоры
Рабочий ход, мм	10	200	2
Погрешность перемещения, нм	100	1000	50
Постоянная времени, мс	<200	<200	<200
Развиваемое усилие, Н	>1000	>1000	>1000
Внешний вид			

В данной работе рассматривается МР привод на основе гидростатической опоры, имеющий самую низкую погрешность перемещения. Привод предполагалось использовать для позиционирования элементарного зеркала составного главного зеркала адаптивного составного телескопа АСТ-25.

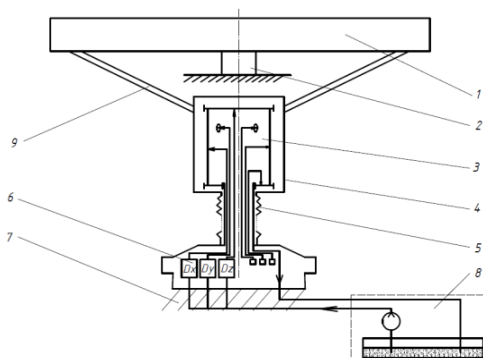


Рис. 7. Схема установки с МР приводом

С помощью системы подачи жидкости 8, суспензия под давлением поступает в привод, протекая через магнитореологические дроссели 6, распределяющие жидкость по шести каналам, соответствующим направлению осей координат. Создавая разность давления в попарно расположенных рабочих полостях, подвижная часть привода 4, упруго соединенная с неподвижным корпусом 3, установленном на основании 7, через сильфон 5 с помощью тяг 9 перемещает зеркало 1, установленное на узле упругой подвески 2. Тем самым, линейные перемещения привода преобразуются в поворотное движение зеркала вокруг оси узла подвески, которая полностью держит нагрузку, позволяя приводу совершать очень точные перемещения с маленькой погрешностью.

Погрешность позиционирования механизма

В магнитореологическом приводе используется замкнутая система: контролируется непосредственно перемещение объекта, а сигнал обратной связи корректирует работу двигателя.

Для замкнутых систем управления приводом, наиболее часто применяемых в прецизионном технологическом и исследовательском оборудовании, погрешность перемещения может быть записана в общем виде [6]:

$$\delta\varphi_p = \delta_n + \delta_l + \delta_c + \delta_{ин} \quad (1)$$

где δ_n – ошибка, обусловленная воспроизведением задающего воздействия системы управления; $\delta_{ин}$ – ошибка, возникающая вследствие воздействия возмущающих сил или начальных условий; δ_c – ошибка, связанная с кинематическими погрешностями привода; δ_l – ошибка, обусловленная люфтом; δ_c – ошибка, обусловленная наличием нагрузок и сил статического сопротивления в приводе; $\delta_{ин}$ – инструментальная ошибка.

Применение систем стабилизации температуры и вибрационной защиты позволяет почти полностью исключить погрешность δ_n , связанную с возмущающими силами и начальными условиями.

Использование современных прецизионных систем измерения положения, в частности лазерных интерферометров, дает возможность значительно уменьшить и сделать практически незначимой погрешность $\delta_{ин}$ ($\delta_{ин} < 10^{-2}$ мкм).

В этом случае основной доминирующей погрешностью, определяющей точность следящего привода с замкнутой системой управления, остается погрешность δ_c , обусловленная наличием нагрузок и сил статического сопротивления в приводе:

$$\delta\varphi_p = \delta_c \quad (2)$$

Таким образом, погрешность позиционирования следящего привода можно свести практически к одной составляющей δ_c , которая определяется зоной нечувствительности при трогании $\delta_{тр}$ следящей системы:

$$\delta_c = 2\delta_{тр} = \frac{2I_{тр}}{k_d k_y}, \quad (3)$$

где $\delta_{тр}$ – зона нечувствительности следящей системы; $I_{тр}$ – ток трогания системы; k_d – коэффициент передачи датчика положения; k_y – коэффициент усиления измерительной системы.

В предлагаемом механизме силы статического трения связаны с сильфонным узлом (силы упругости и механический гистерезис) и с рабочей средой, МР-жидкостью (силы вязкого трения и их зависимость от магнитного поля).

Предыдущие расчеты упругой силы статического сопротивления проводились для случая, в котором сильфон деформируется только в осевом направлении при перемещении вдоль оси z. Осевая жесткость сильфона нормирована ГОСТом. Однако, как показано на рисунке 7, привод перемещается также и в горизонтальной плоскости, при этом сильфон деформируется в поперечном направлении, а его торцы перемещаются плоскопараллельно, эта деформация носит название поперечного изгиба.

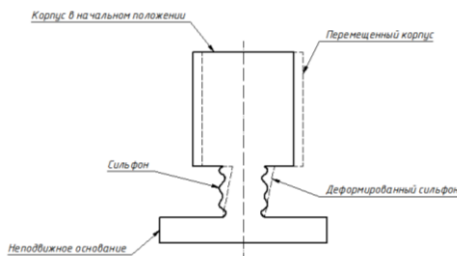


Рис. 8. Схема поперечного изгиба сильфонного узла в механизме



Рис.9. Деформации сильфонного узла

Для определения жесткости вакуумного сиффона на поперечный изгиб, было проведено два расчета: с помощью программы Ansys и на основе научных работ Феодосьева В.И. [7] и Андреевой Л.Е. [8]. Полученные результаты различались достаточно сильно. Имея такое большое расхождение значений, было принято решение провести эксперимент.

Исследование жесткости сиффона при поперечном изгибе

Для проведения эксперимента спроектирована оснастка для установления сиффона на станине и каретке универсального измерительного микроскопа УИМ-23. Схема эксперимента представлена на рис. 10.

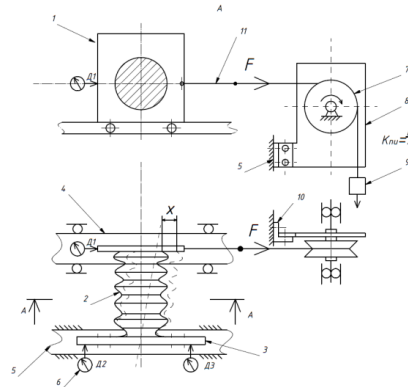


Рис. 10. Схема эксперимента

- 1- Пластина для крепления сиффона к подвижной каретке; 2- Сиффон; 3- Пластина для крепления сиффона к неподвижному основанию; 4- Подвижная каретка; 5- Станина УИМ-3; 6- Датчик; 7- Блок; 8- Трос; 9- Груз; 10- Уголок для крепления блока к станине УИМ-3; 11-Результирующая сила



Рис. 11. Фото экспериментального стенда

Сиффон крепится к двум пластинам с помощью четырех болтов с одной стороны и одного большого с другой. Неподвижная пластина крепится уголку, а тот - к станине микроскопа с помощью четырех болтов, закрученных в глухие отверстия. Подвижная пластина с помощью болтов крепится к уголку, соединяющему два уголка, сделанные для крепления к подвижной каретке микроскопа. На подвижную пластину ставится датчик перемещения, а также крепится трос, перевешенный через блок, прикрученный к пластине, которая через уголок крепится к станине микроскопа в боковые крепежные отверстия. На трос подвешивается груз.



Рис. 12. Внешний вид УИМ-23

Микроскоп универсальный измерительный УИМ-23 предназначен для измерения линейных и угловых размеров изделий координатным методом с помощью оптической

визирной системы. В частности, на приборе можно измерять резьбовые изделия, режущий инструмент, продольные шаблоны и лекала, кулачки, конусы, метчики, резьбонарезные гребенки, диаметры малых отверстий шаг, резьбы. По полученным координатам точек координатно-оптическим устройством определяются диаметры, радиусы, центра окружностей, точки пересечения, расстояния, углы[9].

Технические характеристики:

- Пределы измерений 200х100 мм.
- Диапазон измерения углов 0...360 град.
- Габаритные размеры:
- микроскопа 1400х1300х1000 мм
- подставки 985х730х630 мм.
- Масса микроскопа 460 кг; подставки 142 кг.

По полученным данным о средней деформации сильфона был построен график зависимости деформации сильфона от массы подвешиваемого груза (рис 12). По полученному графику можно сделать вывод, что зависимость линейная.

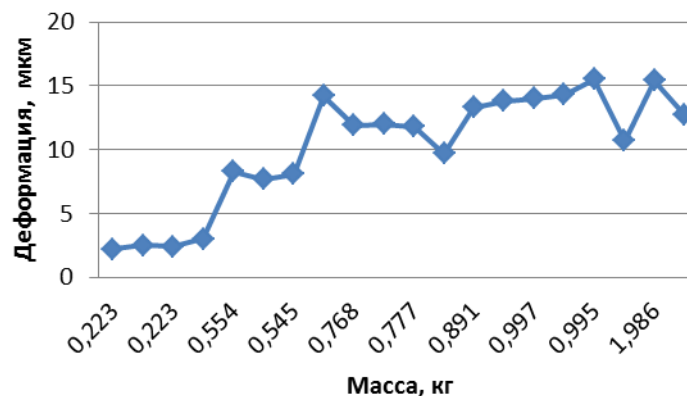


Рис. 13. Результаты эксперимента

Определим жесткость сильфона на основании закона Гука:

$$F = kx \quad (5)$$

$$k = \frac{F}{x}$$

где:

F – величина сдвигающей силы, Н;

x – величина деформации, мм;

Таким образом, жесткость сильфонного узла механизма составляет:

$$k = \frac{10}{0.14} = 71.2 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

Полученная величина жесткости показывает, что теоретический расчет, выполненный на основании работ Феодосьева В.И. и Андреевой Л.Е. (82,8 Н/мм), лучше согласуется с полученными экспериментальными данными, чем программа Ansys (47 Н/мм).

Исследование тока трогания магнитореологической жидкости

Был проведен эксперимент по установлению зависимости максимального давления, которое может задерживать затвердевшая жидкость в рабочем зазоре, от воздействия приложенной на электромагнитную катушку силы тока. Полученные данные позволят определить область рабочих давлений привода при определенных значениях электрического тока [10].

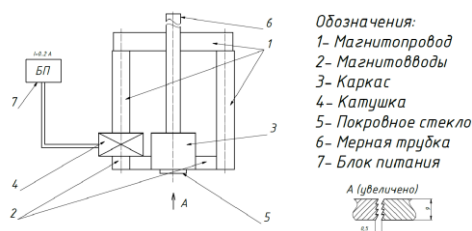


Рис. 14. Схема эксперимента



Рис. 15. Оснастка эксперимента

МР жидкость поступает под контролируемым давлением в рабочий зазор. При подаче тока на электромагнитную катушку, создается магнитное поле, пронизывающее рабочий зазор. В этом месте суспензия повышает свою вязкость, тем самым понижая пропускную способность канала. При увеличении магнитного поля достигается момент, когда МР жидкость в рабочем зазоре полностью затвердевает и течение прекращается. Затем начинается повышение давления с целью возобновления течения жидкости через рабочий зазор. При достижении предела текучести структуры частиц в рабочем зазоре записываются результаты приложенного магнитного поля и величина давления.

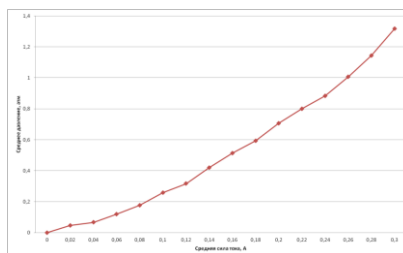


Рис.16. Экспериментальная зависимость давления в зазоре от силы тока

По полученным результатам можно сделать вывод, что характер зависимости прочности образующейся в рабочем зазоре пробки нелинейный. Чем больше ток на катушке, тем большее давление может задержать образовавшаяся из жидкости пробка.

Выводы

1. Магнитореологические механизмы обеспечивают высокую точность позиционирования.
2. Замкнутая система управления в совокупности с современным исследовательским оборудованием позволяет повысить точность привода, исключая измерительную погрешность и погрешность, связанную с возмущающими силами и начальными условиями.
3. Точность привода в наибольшей степени зависит от погрешности, которая определяется зоной нечувствительности при трогании следящей системы.
4. Деформация сиффона от величины нагрузки имеет линейный характер. Коэффициент жесткости сиффона приблизительно равен 71,2 Н/мм.
5. Теоретический расчет, выполненный на основании работ Феодосьева В.И. и Андреевой Л.Е., лучше согласуется с полученными экспериментальными данными, чем программа Ansys.

Литература

1. *Gilbertson, Roger G.* The 10 (or 11) Basic Ways. Mondo-tronics, Inc. • RobotStore.com, 2004.
2. Item # 5183 .Получено 29.11.2014 г., из POSTRA:
<http://rostravernatherm.thomasnet.com/item/all-categories/thermal-actuators/pn-1017>
3. M-272 Linear Drive for Automation.б.д.
<http://www.physikinstrumente.com/en/products/prspecs.php?sortnr=1000650> (дата обращения: 16 декабрь2013 г.).
4. Damcos BRC 125 . б.д. http://www2.emersonprocess.com/en-US/brands/damcos/products/Valve-Remote-Control-Systems/Hydraulic-Acutators/brc/Pages/1_Damcos%20-%20BRC%20125.aspx (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).
5. *Eugeni A. Deulin, V. P.* (2000). Control of adaptive optic elements displacement with help of magnetic rheology drive. Moscow: SPIE.
6. *В.П. Михайлов, А. Б.* Исследование параметров механизмов микро- и наноперемещений: метод. указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Прецизионные механизмы микро- и наноперемещений» . М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 73 с.: ил.
7. *В.И. Феодосьев.* Сопротивление материалов. Изд. 10-е. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.: ил.
8. *Л.Е. Андреева.* Расчет упругих элементов машин и приборов М.: Машиностроение, 1980-326с., ил – (Б-ка расчетчика)
9. Микроскоп универсальный УИМ-23. (б.д.). Получено 15.12.2014 г., из АСМА-Прибор:
http://asma-pribor.ru/catalog/microscopes/micro_uim_23.html
10. *М.С.Мосина.* (2014). Моделирование технологического процесса протекания магнитореологической жидкости через зазор в магнитном поле.