

# 11, ноябрь 2015

УДК 543.271, 533.5.08

## Исследование точности магнитореологического привода

*Мосина М.С., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»*

*Куликова Л.А., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»*

*Научный руководитель: Базиненков А.М., к.т.н, доцент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»*

[ambazinenkov@bmstu.ru](mailto:ambazinenkov@bmstu.ru)

### 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, зондовая микроскопия и др.

Для определения общей погрешности позиционирования механизма необходимо учитывать влияние многих ее составляющих, в том числе и погрешности от сил статического трения, люфтов, кинематическая погрешность и др. Для повышения точности перемещения необходимо устранить влияние максимально большего числа составляющих общей погрешности.

### 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. 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 первоначальной фазе (изменения агрегатного состояния не происходит).

Достоинства механизмов: компактный размер, большой рабочий ход, высокая точность.

Недостатки: низкое 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 ( $\text{SiO}_2$ ).

Достоинства: компактный размер, очень высокая точность.

Недостатки: низкая нагрузочная способность, низкий 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: большой рабочий ход, высокая нагрузочная способность.

Недостатки: низкая точность, громоздкость, необходимость гидравлической системы для подачи рабочей жидкости.

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, большой рабочий ход

Недостатки: низкая точность, необходимость пневмосистемы с компрессором.

Сравнение характеристик рассмотренных приводов представлено в таблице 1.

Таблица 1

Анализ характеристик приводов

| Характеристика | Тип механизма |       |       |        |
|----------------|---------------|-------|-------|--------|
|                | Тепловой      | Пьезо | Гидро | Пневмо |

|                           |          |         |         |         |
|---------------------------|----------|---------|---------|---------|
| Рабочий ход, мм           | 20... 70 | 0,5     | 2000    | 2000    |
| Максимальная нагрузка, кг | До 100   | До 10   | До 1000 | До 1000 |
| Погрешность, нм           | До 10    | 0,05-10 | 1000    | 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. К таким материалам относятся магнитореологические (МР) и электрореологические (ЭР) жидкости и эластомеры, а также феррожидкости.

Магнитореологические жидкости (МРЖ) представляют собой суспензии магнитных частиц (восстановленное железо, чистое железо, кобальт, карбонильное железо, никель) размером от 1 до 20 мкм в жидкости-носителе. Носителем могут выступать различные жидкости, в зависимости от назначения устройства это могут быть: вода, кремний органическая (силиконовая) жидкость, синтетические и полусинтетические масла, минеральные масла и т.д. Под действием магнитного поля, как показано на рисунке 1а, частицы, распределенные в объеме дисперсионной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля (МР эффект). Без влияния частица свободно двигается по рабочему зазору, как показано на рисунке 1б. 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 МРЖ получили широкое распространение в полуактивных демпфирующих устройствах, тормозных системах и жидкостных захватах.



Рис. 1. Схема МР эффекта: а) МРЖ в присутствии магнитного поля  $H$ ;  
б) МРЖ без внешнего поля

МР 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 рисунке 2.

Данный элемент позволяет использовать очень полезное свойство МРЖ – МР эффект, принцип действия которого представлен на рисунке 3. При протекании МРЖ через рабочий зазор дросселя, в отсутствие 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  $V_{\max}$  жидкость не протекает совсем. Дроссель закрыт.

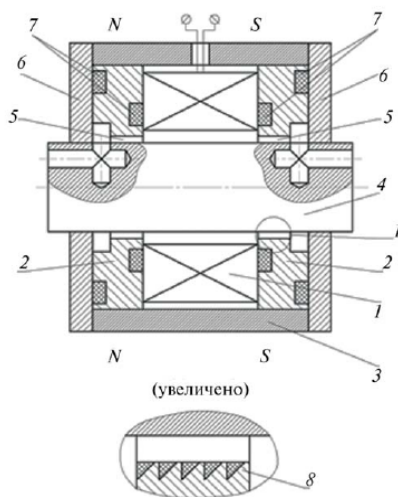


Рис. 2. Схема МРД:

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

Изменяя величину управляющего сигнала, подаваемого на МРД, можно регулировать давление рабочей среды в камерах высокого давления гидравлического привода и перемещать штоки в цилиндрах и каретку по трем координатам X,Y,Z. Линейные перемещения каретки по осям X и Y преобразуются в угловые смещения сегмента вокруг упругого шарнира.

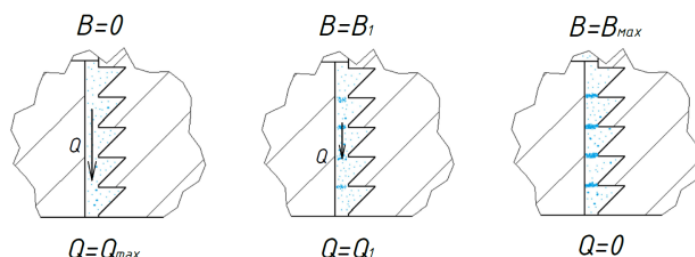
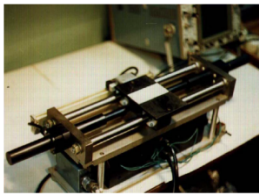


Рис. 3. Принцип действия МР дросселя

В МГТУ имени Н.Э. Баумана на кафедре МТ-11 разрабатываются механизмы точных перемещений и активной виброизоляции на основе указанных материалов. Для наглядности основные параметры магнитореологических приводов сведены в таблицу 2.

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, схема которого представлена на рисунке 4, имеющий самую низкую погрешность перемещения из приводов данного класса. Привод разрабатывался для позиционирования элементарного зеркала составного главного зеркала адаптивного составного телескопа АСТ-25.

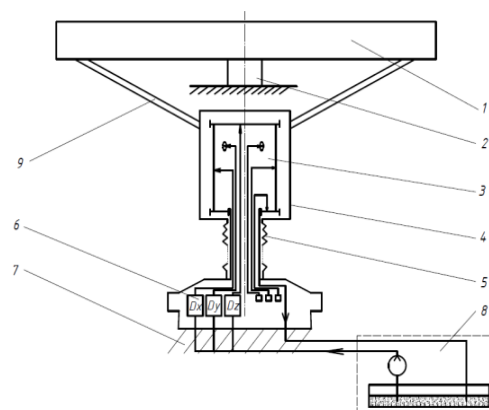


Рис. 4. Схема установки с МР приводом

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 управления: контролируется непосредственно перемещение объекта, а сигнал обратной связи корректирует сигнал на МРД привода.

Для замкнутых систем управления приводом, наиболее часто применяемых в прецизионном технологическом и исследовательском оборудовании, погрешность перемещения может быть записана [1]:

$$\delta\varphi_p = \delta_n + \delta_l + \delta_c + \delta_i, \quad (1)$$

где  $\delta_b$  – ошибка, обусловленная воспроизведением задающего воздействия системы управления;  $\delta_n$  – ошибка, возникающая вследствие воздействия возмущающих сил или начальных условий;  $\delta_k$  – ошибка, связанная с кинематическими погрешностями привода;  $\delta_d$  – ошибка, обусловленная люфтом;  $\delta_c$  – ошибка, обусловленная наличием нагрузок и сил статического сопротивления в приводе;  $\delta_i$  – инструментальная ошибка.

Применение систем стабилизации температуры и вибрационной защиты позволяет почти полностью исключить погрешность  $\delta_n$ , 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  $\delta_i$  ( $\delta_i < 10^{-2}$  мкм), являющуюся слагаемым в формуле (1).

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

$$\delta\varphi_p = \delta_c.$$

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

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

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, МРЖ (силы вязкого трения и их зависимость от магнитного поля). Именно характеристики указанных компонентов привода составляют неизвестные параметры уравнения (2).

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 по ГОСТ. Однако, как показано на рисунке 5, 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 и схематично изображена на рисунке 6.

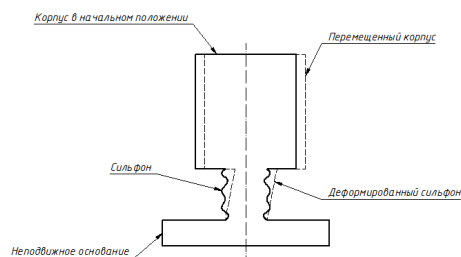


Рис. 5. Схема поперечного изгиба сильфонного узла в механизме

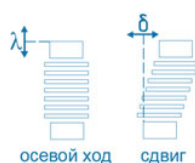


Рис. 6. Деформации сильфонного узла

Для определения жесткости вакуумного сильфона на поперечный изгиб, было проведено два расчета: с помощью программы Ansys и на основе научных работ Феодосьева В.И. [2] и Андреевой Л.Е. [3]. Полученные результаты различались достаточно сильно. Имея такое большое расхождение значений, было принято решение провести эксперимент.

### **Исследование жесткости сильфона при поперечном изгибе**

Для проведения эксперимента спроектирована оснастка для установления сильфона на станине и каретке универсального измерительного микроскопа УИМ-23.

Микроскоп универсальный измерительный УИМ-23, внешний вид которого изображен на рисунке 9, предназначен для измерения линейных и угловых размеров изделий координатным методом с помощью оптической визирной системы. По полученным координатам точек координатно-оптическим устройством определяются диаметры, радиусы, центра окружностей, точки пересечения, расстояния, углы.

Технические характеристики:

- Пределы измерений 200x100 мм.
- Диапазон измерения углов 0...360 град.

Габаритные размеры:

- микроскопа 1400x1300x1000 мм

- подставки 985x730x630 мм.

Масса микроскопа 460 кг; подставки 142 кг.

Схема эксперимента представлена на рисунке 7, а фотография – на рисунке 8.

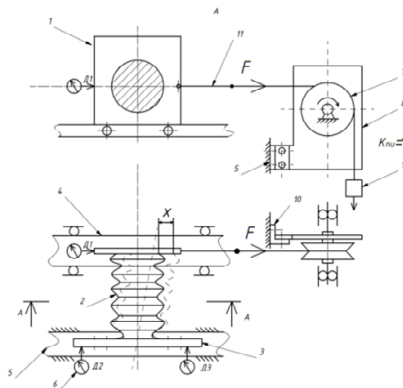


Рис. 7. Схема эксперимента:

1- Пластина для крепления сильфона к подвижной каретке; 2- Сильфон; 3-Пластина для крепления сильфона 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

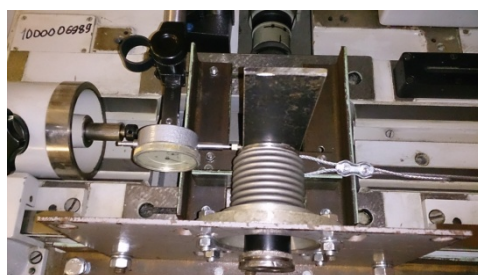


Рис. 8. Фото экспериментального стенда

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. 9. Внешний вид УИМ-23

По полученным данным о средней деформации сильфона был построен график зависимости деформации сильфона от массы подвешиваемого груза, представленный на рисунке 10. По полученному графику можно сделать вывод, что зависимость близка к линейной.

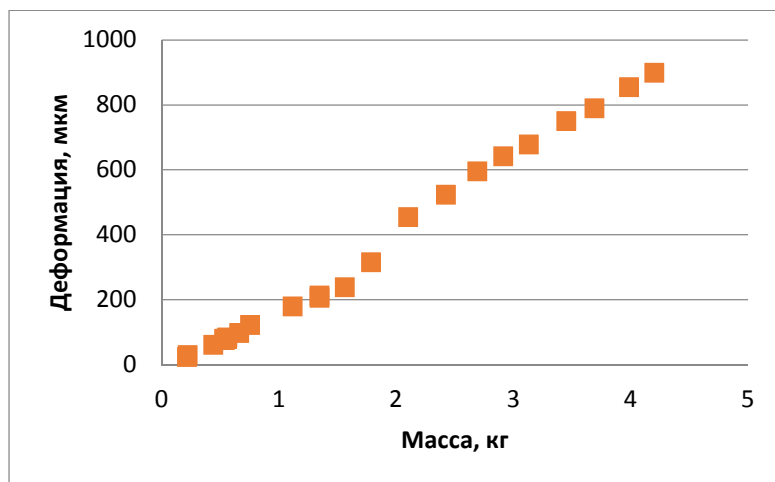


Рис. 10. Результаты эксперимента

Определим коэффициент жесткости сильфона при поперечном изгибе на основании закона Гука:

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

где  $F$  – величина сдвигающей силы, Н;  $x$  – величина деформации, мм.

Таким образом, жесткость сильфонного узла механизма составляет:

$$k = 46,29 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}.$$

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

### Исследование тока трогания магнитореологической жидкости

Эксперимент по установлению зависимости максимального давления, которое может задерживать затвердевшая МРЖ в рабочем зазоре, от воздействия приложенной на электромагнитную катушку силы тока необходим для настройки системы автоматического управления приводом. Полученные данные позволят определить область

рабочих давлений привода при определенных значениях электрического тока. Схема эксперимента представлена на рисунке 11, фото оснастки – на рисунке 12.

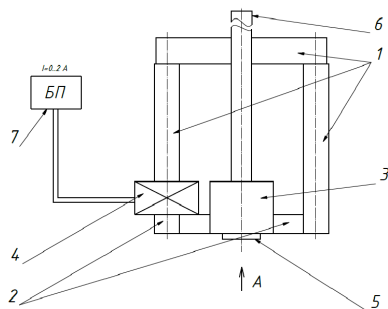


Рис. 11. Схема эксперимента:

- 1- Магнитопровод; 2- Магнитоввод; 3- Каркас; 4- Катушка;  
5- Покровное стекло; 6- Мерная трубка; 7- Блок питания

МРЖ 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.



Рис. 12. Оснастка эксперимента

При увеличении магнитного поля достигается момент, когда МРЖ 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.

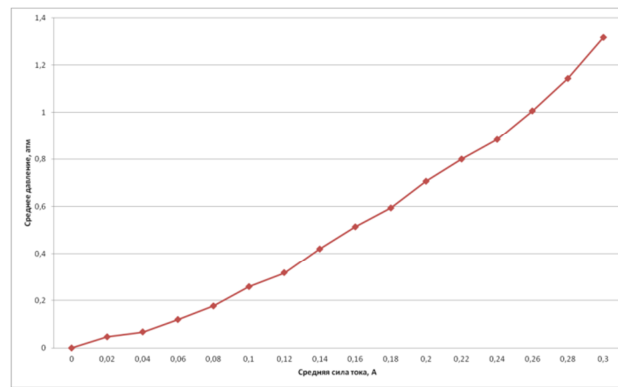


Рис. 13. Экспериментальная зависимость давления в зазоре от силы тока

По полученным результатам, представленным на рисунке 13, 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 при сохранении высокой нагрузочной способности.
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. Зависимость деформации сальфона от величины нагрузки при поперечном изгибе имеет линейный характер. Коэффициент жесткости сальфона равен 46,29 Н/мм.

### Список литературы

1. Михайлов В.П., Базиненков А.М. 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.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. 10-е. изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.

3. Пономарев С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов М.: Машиностроение, 1980. 326 с.