

## МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

Мария Сергеевна Мосина, Алексей Михайлович Базиненков

*Студентка 4 курса,  
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.М. Базиненков,  
Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Электронные технологии в  
машиностроении»*

### Введение

Современное исследовательское и технологическое оборудование требует точное перемещение объектов. Максимальная погрешность позиционирования механизма может достигать 1 нм при больших диапазонах перемещений объектов до 500 мм (в оборудовании сканирующей зондовой микроскопии и микролитографии). Кроме того, масса перемещаемого объекта может достигать 100 кг (для оборудования адаптивной оптики, в сверхбольших адаптивных составных телескопах) [8].

Кроме точного перемещения объектов необходимо обеспечить защиту прецизионного оборудования от вибраций, амплитуда которых может достигать 200 мкм при частотах 1...200 Гц. Наиболее эффективным способом защиты объектов от вибраций является активная виброизоляция, где виброперемещения компенсируются дополнительным источником движения, перемещающим объект в противофазе с вибрациями.

Для точного перемещения объектов и активной их виброизоляции необходимо применение механизмов точного позиционирования (приводов).

### Основные типы приводов

По принципу преобразования разных видов энергии в кинетическую энергию перемещения рабочего тела, приводы можно разделить на несколько основных групп [10]:

1. Тепловой привод – превращает тепловую энергию в кинетическую. Существует также несколько способов получения движения из тепловой энергии [2]

1.1. Привод с фазовыми превращениями. Использование системы фазового перехода - расширения и/или сжатия, которое происходит в некоторых материалах, когда они претерпевают фазовые изменения агрегатного состояния (твердое, жидкое, газообразное) (рис. 1).



Рис. 1. Принцип действия привода с фазовыми превращениями [2]

1.2. Термомеханический привод. Размеры материала изменяются 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) (рис. 2).

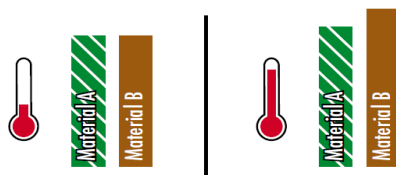


Рис. 2. Принцип действия термомеханического привода [2]

Например, по данному принципу работают биметаллические термостатические элементы, используемые в регулировании температуры помещений и в тостерах. Эти устройства используют различные скорости расширения двух материалов, соединенных вместе для получения различных деформаций.

1.3. Привод на основе материалов с памятью формы (СПФ). Материалы СПФ легко обратимо деформируются при снижении температуры. И восстанавливают изначальную деформацию при повышении температуры до начальной (рис. 3).

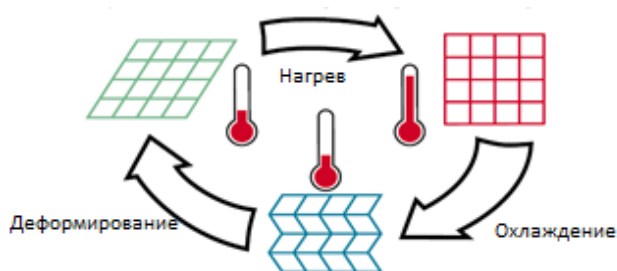


Рис. 3. Принцип действия привода с памятью формы [2]

Примером теплового привода является привод Vernatherm 5028. Вне зависимости от типоразмера привода, эти быстродействующие механизмы позволяют получать высокие усилия на исполнительном элементе при больших диапазонах перемещений и эффективности управления [3].



Диапазон рабочих температур (° F)	30-300
Рабочий ход (в)	0,090 - 0,250
Максимальный ход (в)	0,300
Максимальная нагрузка (кг)	46
Мин Вернуться нагрузки (кг)	25

Рис. 4 Внешний вид и технические характеристики теплового привода Vernatherm 5028 [3]

2. Электрический привод. Данный механизм преобразует энергию электромагнитного поля в кинетическую энергию исполнительного механизма. Электропривод (ГОСТ Р 50369-92) - электромеханическая система, состоящая из преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и

информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса (рис. 5).

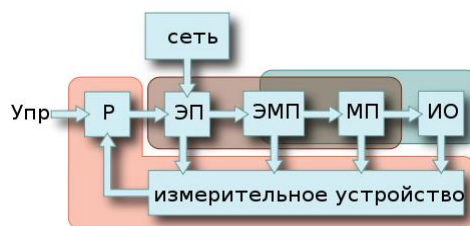


Рис. 5 Функциональная схема электропривода [11]

Существует несколько способов использовать электрическую энергию для получения перемещения [2].

2.1. Электрореологический (ЭР) привод. Работает за счет того, что рабочая среда, электрореологическая жидкость (ЭРЖ) меняет свои реологические свойства при воздействии на нее внешним электрическим полем (ЭР-эффект) (рис. 6).

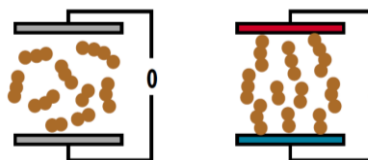


Рис. 6. Принцип действия ЭР-привода [2]

2.2. Магнитогидродинамический (МГД) привод. Движение возникает, когда частицы магнитной или парамагнитной жидкости подвергаются действию сильного магнитного поля (рис. 7).

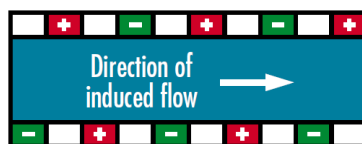


Рис. 7. Принцип действия магнитогидродинамического привода [2]

В результате движение может быть использовано для создания перепада давлений текучей среды, а также можно создавать поток или циркуляцию жидкости.

2.3. Привод на основе электрически-активных полимеров (ЕАП). Электрическое поле прикладывается к ЕАП и генерирует движение среды и мобильных положительных ионов в полимерном композите.

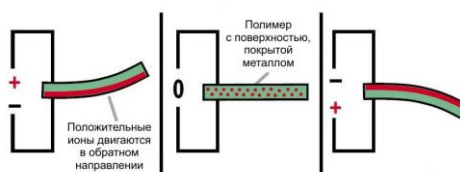


Рис. 8. Принцип действия привода на основе ЕАП [2]

ЕАП деформируется в результате напряжений, создаваемых движущимися

ионами.

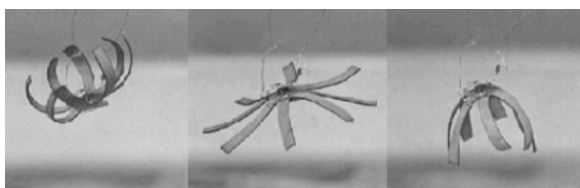


Рис. 9. Примеры деформирования ЕАП [2]

2.4. Электростатический привод. В результате приложения электрического поля (разности потенциалов) возникает электростатический заряд от избытка или дефицита свободных электронов в материале. Эти заряды могут притягиваться к противоположно заряженным объектам, или отталкиваться от аналогично заряженных объектов.



Рис. 10. Схема работы электростатического привода [2]

Таким образом, сила кулоновского взаимодействия между противоположно заряженными частицами позволяет приводить в движение детали сложных машин. Однако, при этом детали должны являться проводниками.

2.5. Магнестрикционный привод (на основе материалов, обладающих магнестрикционными свойствами). Магнестрикционные материалы обладают очень малыми, но устойчивыми и обратимыми изменением формы при воздействии магнитных полей. Рабочие органы развивают высокие усилия, но при малых диапазонах перемещений, как правило, менее чем на 1% от начального размера. Типичные магнестрикционные материалы включают комбинации редкоземельных элементов с железом, таких как TbFe (Терфенол) и TbDyFe (Терфенол-D).

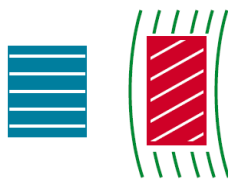


Рис. 11. Принцип действия магнестрикционного привода [2]

2.6. Электромагнитный привод. Как известно электрические и магнитные поля связаны друг с другом и одно порождает другое (уравнения Максвелла). Силы притяжения или отталкивания, возникающие в сердечнике электромагнитной системы, пропорциональны силе тока, пропускаемой через катушку индуктивности системы. Типичные примеры электромагнитных устройств: электрический двигатель, соленоид, реле, катушки звукового динамика и электронно-лучевые трубки.



Рис. 12. Принцип действия электромагнитного привода [2]

2.7. Пьезоэлектрический привод. 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 ( $\text{SiO}_2$ ).

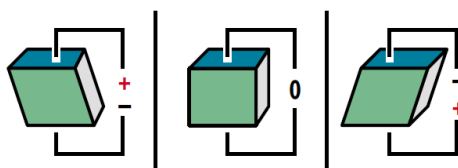


Рис. 13. Принцип действия пьезоэлектрического привода [2]

Примером электрического привода является компактный линейный привод – M272 (Physik Instrumente (PI), Германия) (рис. 14). Это керамический прямой привод, самоблокирующийся в состоянии покоя. [4].



Рис. 14. Внешний вид электрического привода M272 [4]

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

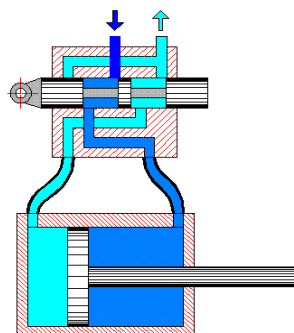


Рис. 15 Принцип действия золотникового гидрораспределителя, управляющего движением штока гидроцилиндра [9]

Приводной двигатель передаёт вращающий момент на вал насоса, который сообщает энергию рабочей жидкости. Рабочая жидкость по гидравлическим линиям (трубопроводам) через регулирующую аппаратуру поступает в гидравлические двигатели, где гидравлическая энергия сжатой среды преобразуется в механическую энергию движения поршня. После этого рабочая жидкость по гидролиниям

возвращается либо в бак, либо на слив насоса [16].

Примером гидравлического механизма является гидравлический привод двойного действия Damcos BRC 125 (Emerson Electric Co (США)) (рис. 16). Обеспечивает высокий крутящий момент без необходимости больших размеров, и подходит для самых требовательных условий, при высокой вибрации и тяжелых условиях [1].



Рис. 16. Внешний вид привода Damcos BRC 125 [1]

4. Пневматический привод – 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.

Приводной двигатель передаёт вращающий момент на вал компрессора, который сообщает энергию рабочему газу. Рабочий газ после специальной подготовки по пневматическим линиям через регулирующую аппаратуру поступает через пневмодвигатель в пневматические цилиндры, где пневматическая энергия сжатого воздуха преобразуется в механическую энергию перемещения штока.

Примером механизма является линейный трехкоординатный привод SLM (Festo AG & Co, Германия) (рис. 17).

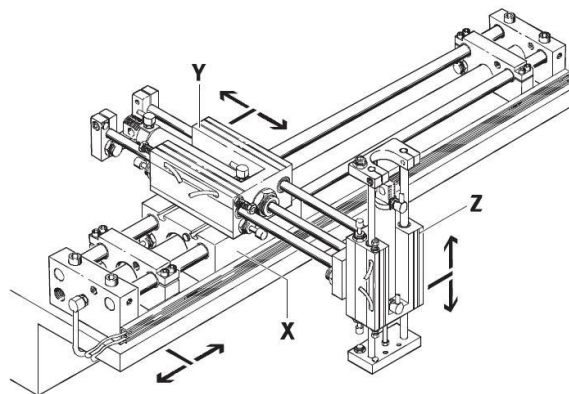


Рис. 17. Внешний вид пневматического привода LM (Festo, Германия)

При изучении возможных способов получения движения из преобразований различных видов энергий в кинетическую проведен анализ существующих приводов. Основные характеристики занесены в таблицу 1.

Выявлено, что все существующие приводы не полностью удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых системами точного позиционирования и виброизоляции. Поэтому для конкретного оборудования необходимо решать задачу выбора типа механизма и разработки его конструкции.

Таблица 1. Анализ характеристик приводов

Характеристика	Тип механизма			
	Тепловой	Пьезо	Гидро	Пневмо
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, нм	До 10	0,05-10	1000	1000

### Гидравлические механизмы на основе материалов управляемыми реологическими свойствами

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.

Среди этих материалов можно выделить магнитореологические (МР) жидкости, ЭР-жидкости и МР-эластомеры. Эти материалы относятся к классу smart-материалов (как и магнитострикционные и пьезоэлектрические материалы).

Эти жидкости и эластомеры способны выступать в качестве рабочего тела в механизмах перемещений. При этом, подобные механизмы потенциально способны обеспечить достаточно высокие характеристики точности и быстродействия за счет управления средой прямым воздействием поля на нее без промежуточных инерционных элементов.

ЭР-жидкости способны менять свои реологические свойства под действием электрических полей. Это изменение носит название ЭР-эффекта. ЭР-жидкости – это суспензии, состоящие из неполярной дисперсной среды и твердой дисперсной фазы с достаточно высокой диэлектрической проницаемостью. Дисперсными средами могут служить неполярные или слабополярные органические жидкости. В качестве дисперсной фазы широко применяется кремнезем в различных модификациях. Размеры частиц не более 1-10 мкм.

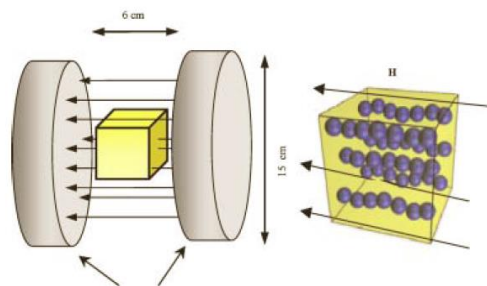
МР-жидкости представляют собой суспензии магнитных частичек (восстановленное железо, чистое железо, кобальт, карбонильное железо, никель) размером порядка 1...20 мкм в жидкости-носителе.носителем могут выступать различные жидкости, в зависимости от назначения устройства это могут быть: вода, кремнийорганическая (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. 18). 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 полуактивных демпфирующих устройствах, тормозных системах и жидкостных захватах.



Рис. 18. MR-эффект [7]

MR-эластомеры включают в себя обширный класс материалов на основе самых различных вязкоупругих матриц, включая натуральные и синтетические резины, силикон, полиуретан и пр., с различной объемной долей порошкообразного магнитного наполнителя, находящегося внутри матрицы. Взаимодействие между матрицей и частицами наполнителя может быть различной силы, и это оказывает влияние на реологические и механические свойства композита. Структурно они могут рассматриваться как твердые аналоги магнитореологических жидкостей, поэтому физические явления, лежащие в основе полевой чувствительности свойств этих материалов, очень схожи.

Частицы внутри MR-эластомера могут быть распределены однородно или сгруппированы (например, в столбчатые структуры-цепочки). Для образования упорядоченной структуры во время изготовления композиции, содержащей магнитные частицы, прикладывается внешнее однородное магнитное поле. Под действием магнитного поля частицы наполнителя образуют столбчатые структуры-цепочки, которые в результате полимеризации оказываются зафиксированными в полимерной матрице. Такой тип обработки в процессе изготовления позволяет получить вязкоупругие материалы со специальными анизотропными свойствами.



полюса электромагнита

Рис. 19. Схема действия магнитореологического эластомера [5]

Когда эластомеры подвергаются воздействию внешнего магнитного поля, модуль упругости в определенном направлении материала будет изменяться в зависимости от напряженности приложенного магнитного поля и его направления (в зависимости от внутреннего распределения частиц). Эти характеристики позволяют превратить материалы с изотропными свойствами в каждом направлении. Максимальное увеличение по модулю магнитореологических эластомеров составляет почти 0,6 МПа [5].

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

3-х координатный гидравлический привод с магнитореологическим управлением с сальфонной герметизацией является механизмом параллельной кинематики и работает следующим образом. Подвижный составной шток 1 привода (рис. 20)

перемещается относительно основания 4 за счет разности давлений, создаваемой МР-дресселями (МРД) 5 в гидроцилиндрах 2. МРД распределяют поток рабочей МР-жидкости, подаваемой насосной станцией 3, между гидроцилиндрами. Сильфонные узлы 6 обеспечивают герметизацию гидроцилиндров привода и, за счет своей разной жесткости в осевом и радиальном направлении, служат упругими направляющими подвижного штока. Работа МРД основана на изменении реологических свойств (вязкости, упругости, пластичности) жидкости в рабочем зазоре МРД при приложении магнитного поля [6].

Технические характеристики привода:

- рабочий ход - 10 мм;
- погрешность перемещения - 100 нм;
- постоянная времени - <200 мс;
- развиваемое усилие - >1000 Н.

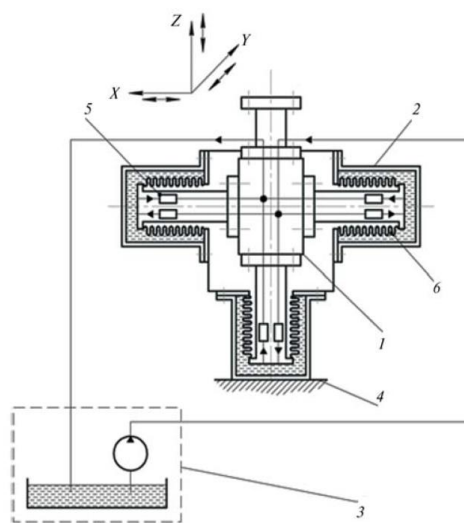


Рис. 20. Схема 3-хкоординатного гидравлического привода с МР управлением с сильфонной герметизацией [12]: 1-подвижный шток; 2-гидроцилиндры; 3-насосная станция; 4-неподвижное основание; 5-магнито-реологические дроссели; 6-сильфонные узлы

Магнито-реологический однокоординатный юстировочный модуль с герметизацией при помощи тонкостенных резиновых оболочек (ТРО) [6].

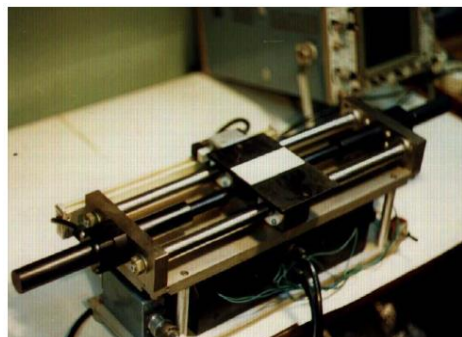


Рис. 21. Общий вид однокоординатного привода [6]

Однокоординатный привод (рис. 22) состоит из штока 1, закрепленного на каретке 2. Каретка перемещается по направляющим скольжения 4, в качестве элементов скольжения используются фторопластовые втулки 3. Концы штока

расположены в гидроцилиндрах 5, в которых находится МР-жидкость, и уплотняются при помощи ТРО 6.

Рабочая жидкость подается с постоянным расходом через МРД 10 в гидроцилиндры 5 при помощи насосной станции. Давление рабочей жидкости на выходе насосной станции измеряется при помощи деформационного манометра.

При подаче управляющих сигналов на катушки МРД в зазорах дросселей наблюдается МР-эффект, происходит структурирование частиц карбонильного железа и увеличение динамической вязкости рабочей жидкости. Таким образом, пропускная способность дросселя уменьшается и в гидроцилиндрах привода создается перепад давлений, в результате которого возникает сила, действующая на каретку привода.

Технические характеристики привода:

- рабочий ход – 200 мм;
- погрешность перемещения – 1000 нм;
- постоянная времени – < 200 с;
- развиваемое усилие: > 1000 Н

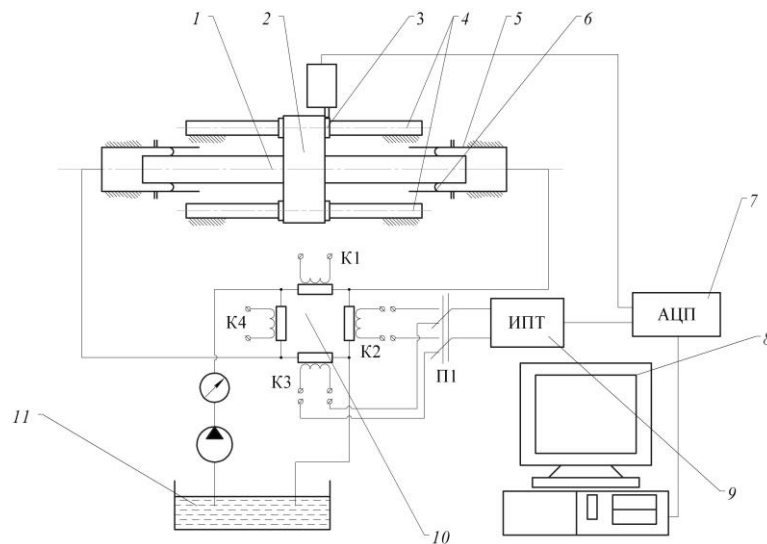


Рис. 22. Схема однокоординатного МР-привода: 1-шток; 2-каретка; 3-втулки; 4-направляющие; 5-гидроцилиндры; 6-ТРО; 7-блок АЦП; 8-ЭВМ; 9-источник постоянного тока (ИПТ); 10-магнитореологические дроссели; 11-насосная станция

Гидравлический МР-привод на основе гидростатической направляющей (рис. 23) содержит подвижную каретку 1, неподвижное основание 2, шток 3 с выполненными в нем четырьмя радиальными и двумя осевыми камерами высокого давления, три пары МРД 4, расположенные на входе в камеры высокого давления, сильфон 5, тонкостенную резиновую оболочку 6, упругий шарнир 7, объект 8 и датчик перемещения 9.

Модуль работает по принципу гидростатической направляющей следующим образом. Рабочая среда – МР-жидкость подается через входные МРД 4 в радиальные и осевые камеры высокого давления штока 3 и далее через рабочие зазоры между штоком и кареткой поступает на слив. Изменяя величину управляющего сигнала, подаваемого на МРД, можно регулировать давление рабочей жидкости в камерах высокого давления и перемещать каретку 1 по трем координатам X, Y, Z. Линейные перемещения каретки 1 по осям X и Y могут преобразовываться в угловые смещения объекта 8 вокруг упругого шарнира 7.

Технические характеристики привода:

- рабочий ход - 2 мм;

- погрешность перемещения - 50 нм;
- постоянная времени - 200 мс;
- развиваемое усилие - >1000 Н.

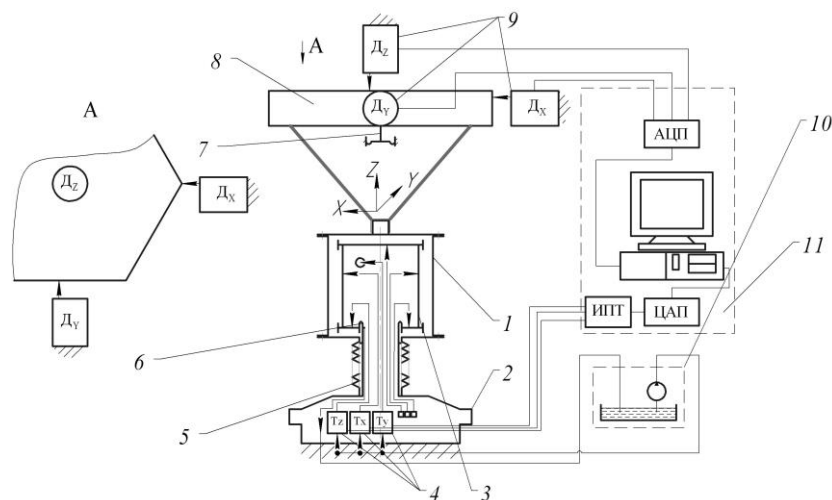


Рис. 23. Гидравлический МР-привод на основе гидростатической направляющей:  
 1-каретка; 2-основание; 3-шток; 4-МРД; 5- сильфон;  
 6-ТРО; 7-упругий шарнир; 8-объект; 9-датчики положения;  
 10-насосная станция; 11-система управления

## Выводы

1. Существующие приводы не полностью удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых системами точного позиционирования и виброизоляции. Поэтому для конкретного оборудования необходимо решать задачу выбора типа механизма и разработки его конструкции.

2. Устройства позиционирования на основе МР и ЭР материалов могут быть успешно применены для управления перемещением и виброизоляцией. За счет применения этих материалов можно исключить из конструкции устройств подвижных управляющих инерционных элементов с внешним трением, что позволяет существенно повысить точность (погрешность позиционирования 50-100 нм) и быстродействие (постоянная времени до 100 мс) микро- и нанопозиционирования. Также механизмы обладают всеми преимуществами гидравлического привода: высокой нагрузочной способностью и могут обеспечить качественную пассивную и полуактивную виброизоляцию.

## Литература

1. *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](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.).
2. Gilbertson, Roger G. *The 10 (or 11) Basic Ways*. Mondo-tronics, Inc. • RobotStore.com, 2004.
3. *Item # 5028, Thermal Actuator*. б.д. <http://rostravernatherm.thomasnet.com/item/all-categories/thermal-actuators/pn-1014?assetid=g2> (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).

4. M-272 *Linear Drive for Automation.* б.д.  
<http://www.physikinstrumente.com/en/products/prspecs.php?sortnr=1000650> (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).
5. *Magneto Rheological Elastomers.* б.д. <http://www.ioniqa.com/magneto-rheological-elastomers/> (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).
6. Анисимов В.В., Деулин Е.А., Михайлов В.П. *New high precision magnetic drives.* М: ВМSTU, б.д.
7. Базиненков А. М., Добер В. А., Михайлов В. П. «Исследования свойств магнитореологических жидкостей и их использования в устройствах перемещения и виброизоляции.» Наука и образование, 2012.
8. Богданов К.Ю. *ЧТО МОГУТ НАНОТЕХНОЛОГИИ.* б.д.  
<http://kbogdanov5.narod.ru/index.htm> (дата обращения: 13 декабрь 2013 г.).
9. *Гидравлический привод.* б.д. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Гидравлический\\_привод](http://ru.wikipedia.org/wiki/Гидравлический_привод) (дата обращения: 15 декабрь 2013 г.).
10. *Привод.* б.д.  
<http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%B4> (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).
11. *Электрический привод.* б.д. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический\\_привод](http://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический_привод) (дата обращения: 15 декабрь 2013 г.).