

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА НА ОСНОВЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ОПОРЫ С МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

**Шелковый М.А.
Базиненков А.М.**

Московский государственный
технический университет
имени Н.Э. Баумана
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ул. 2-я Бауманская, 5 с. 4,
г. Москва, 105005,
Российская Федерация

shma18t387@student.bmstu.ru

Гидравлический привод с магнитоэологическим управлением является эффективным решением при необходимости обеспечить прецизионное позиционирование массивного объекта. Согласно ранее проведенным теоретическим исследованиям магнитоэологический привод способен обеспечить позиционирование объекта массой до 100 кг с погрешностью до 50 мкм. Динамические характеристики потока рабочей жидкости в различных сечениях трубопровода определяют технические характеристики устройства в целом.

В работе проведено исследование гидравлических характеристик привода методом конечных элементов при ламинарном режиме течения. Исследование давления на входе и выходе магнитоэологического дросселя показало, что падение давления составляет от 8,2 кПа до 26,2 кПа в зависимости от давления на входе в гидравлическую систему и расположения дросселя. Скорость течения жидкости в технологическом зазоре составила 1 м/с в центре канала и позволяет оценить поведение привода при различных рабочих давлениях, а также в дальнейшем провести полное моделирование системы для реализации системы управления механизма.

Ключевые слова: магнитоэологическая жидкость; гидравлический привод; магнитоэологический дроссель; рабочий зазор; метод конечных элементов; расход жидкости; перепад давлений

1 Введение

Динамические характеристики оборудования определяют возможность его применения в различных областях техники.

Применение «смарт»-материалов (от англ. smart materials) при конструировании устройств перемещений позволяет обеспечить высокие точность и быстродействие механизмов на их основе. В настоящее время в научном сообществе появляется существенно больше исследований, посвященных «смарт»-материалам. Интерес к данным материалам вызван особым свойством обратимо изменять свои характеристики при внешнем воздействии. Широкое распространение

получили магнитоэологические жидкости (МРЖ) и устройства на их основе [1].

Динамические характеристики устройств на основе МРЖ могут быть исследованы как аналитически и экспериментально, так и численным методом конечных элементов (МКЭ). Сочетание методов исследования предпочтительно, так как, при условии схожести модели с экспериментом, модель может быть использована в дальнейшем для прогнозирования поведения вновь разрабатываемых узлов и механизмов.

Среди устройств на основе МРЖ встречаются такие механизмы, как герметизаторы, демпферы, тормоза, а также дросселирующие устройства и клапаны.

2 Современные исследования устройств на основе МРЖ

Наиболее часто МРЖ применяется в качестве рабочей жидкости в полуактивных демпфирующих устройствах [2]. Эффективность подобного применения обусловлена возможностью полуактивного гашения вибраций за счёт особенностей поведения жидкости, в частности свойством локально и до 10^5 раз изменять реологические характеристики во внешних магнитных полях. Свойства МРЖ обусловлены в большей степени их составом, размером частиц магнитного наполнителя и технологией изготовления.

МРЖ являются растворами и относятся к классу золей, поскольку размер частиц находится в диапазоне от 1 до 100 мкм. Особенностью МРЖ является резкое локальное увеличение эквивалентной вязкости и появление предела упругости при воздействии внешнего магнитного поля.

Наиболее часто МРЖ применяют в конструировании приводов прецизионных перемещений, основанных на магнитоэологических (МР) дросселирующих устройствах, устройствах вибрационной защиты, а также устройствах финишной обработки заготовок в машиностроении и оптике [1, 3].

Исследования динамических характеристик демпфера [4] на основе МРЖ показали эффективность магнитоэологического метода демпфирования вибраций. Конструкция демпфера предусматривает наличие подвижных частей, узлов трения, а также катушек индуктивности, которые создают магнитные поля для управления МРЖ. Ядром работы является магнитный расчёт демпфера, позволяющий в дальнейшем моделировать течение жидкости при различных управляющих сигналах. Результаты магнитного расчёта аппроксимируются, с целью обеспечить возможность вычисления магнитной индукции в каждой точке исследуемого канала течения МРЖ. Таким образом, при использовании модели двойной вязкости и модели многоступенчатого гистерезиса (МСГ) были построены гистерезисные петли демпфирования демпфера. Полученные ре-

зультаты не применимы к гидравлическому приводу из-за существенной разницы в режимах течения среды.

Известна конструкция магнитоэологического дросселя типа «противомоскитная пластина» [5]. Особенностью такого устройства является спиралевидная форма канала, через который протекает МРЖ. В работе приводится математическая модель падения давления в канале. Кроме этого, исследователи проводят анализ МКЭ распределения магнитных потоков в жидкости. Недостатком работы является то, что авторы не проводят моделирование всей гидравлической системы, в которой предполагается применение данного устройства, что ограничивает возможности применения модели.

Известно устройство для определения напряжения сдвига МРЖ [6]. Описываемое исследователями устройство представляет собой поршень в цилиндре. Поршень имеет два отверстия, через которые МРЖ перетекает из одной полости цилиндра в другую, а также катушку индуктивности, что в совокупности позволяет провести измерение усилия, требуемого для просачивания МРЖ через отверстия при воздействии внешнего электромагнитного поля. Однако, в данном исследовании не приведено влияние магнитного поля на поток МРЖ в каналах.

Известно исследование температурного фактора МР демпфера [7]. Авторы приводят модель, полученную с использованием МКЭ, и изучают нагрев МРЖ и стенок демпфера при различных значениях управляющего тока. Данное исследование вызывает интерес, поскольку демпфирующее усилие подобных устройств снижается при повышении температуры, что связано со значительным влиянием температуры на вязкость жидкости-носителя и всей суспензии.

Для выявления расходных характеристик приводных устройств на основе МРЖ было принято решение провести моделирование с использованием МКЭ всей гидравлической системы привода. Подобное исследование позволяет в дальнейшем использовать полученные результаты для моделирования пе-

ремещений, выявления недостатков конструкции привода, а также повышения эффективности автоматического регулирования. Рассмотренные ранее исследования не включали в себя моделирование устройств в комплексе или же касались иных устройств с применением МРЖ. Кроме того, исследования не включали моделирование устройств типа гидростатической опоры.

3 Конструкция объекта исследований

В работе проводится исследование характеристик гидравлической системы гидравлического привода на основе гидростатической опоры с МР управлением, представленного на рисунке 1. Рассматриваемый привод, согласно ранее проведённым теоретическим исследованиям [8], способен обеспечивать прецизионное перемещение объекта массой до 100 кг с погрешностью порядка 50 нм в диапазоне 2 мм. Одним из потенциальных применений устройства является позиционирование зеркал адаптивного телескопа.

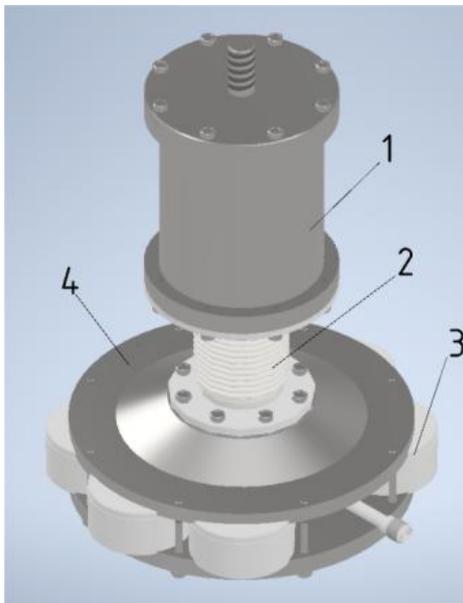


Рисунок 1. Магнитореологический привод на основе гидростатической опоры
1 – подвижная часть; 2 – сильфон-направляющая; 3 – МР дроссель; 4 – неподвижная часть

Особенностью конструкции является наличие МР дросселя (МРД), за счёт которого достигается исключение из конструкции

инерционных механических элементов управления приводом и, как следствие, потенциально малая постоянная времени и низкая погрешность позиционирования. Конструкция МРД представлена на рисунке 2, а его технические характеристики подробно рассмотрены в предыдущем исследовании [9].

Поток жидкости в камеру высокого давления привода регулируется за счёт магнитного поля, создаваемого электромагнитной системой МРД в технологическом зазоре, где протекает МРЖ.

Принцип действия МРД основан на способности МРЖ локально изменять эквивалентную вязкость при воздействии внешнего магнитного поля. Жидкость поступает в дроссель через 4 отверстия, расположенных в нижней части корпуса и протекает через технологический зазор дросселя, создаваемый между корпусом и крышкой.

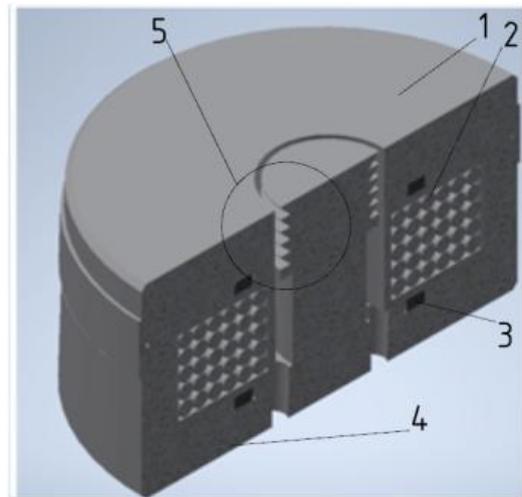


Рисунок 2. Магнитореологический дроссель
1 – крышка; 2 – катушка индуктивности; 3 – резиновое уплотнение; 4 – корпус; 5 – технологический зазор

Важной особенностью конструкции является форма и положение каналов для протекания МРЖ. В нижнем фланце привода выполнен канал, через который МРЖ поступает в нижнюю часть МРД. При прохождении через технологический зазор дросселя жидкость локально изменяет свою вязкость, вследствие чего перепад давлений на МРД повышается, а расход жидкости снижается.

Поток жидкости поступает в каналы верхнего фланца, откуда через каналы подводится в камеры высокого давления. Число камер и МРД соответствует числу направлений, в которых возможны перемещения привода. Из камер жидкость удаляется через сливные каналы. Перемещения осуществляются за счёт изменения расхода МРЖ, при подаче управляющего сигнала на МРД, в одну из двух камер высокого давления, расположенных на одной из осей перемещения, что приводит к выводу гидростатической опоры из равновесия.

В связи с этим происходят постоянные колебания диаметров гидростатической опоры и, как следствие, изменения сечения каналов, в которых протекает МРЖ. Изменение объема камеры высокого давления в процессе перемещения влечёт за собой изменение режимов течения жидкости в МРД, входных и сливных каналах привода.

Работа привода предполагается при входном давлении от 4 до 6 атм., в связи с чем необходимо моделирование гидравлической системы с целью определения характеристик течения жидкости.

Проведённый в работе предварительный расчёт гидравлической системы показал, что даже при ламинарном течении жидкости имеет место неравномерность распределения давления в каналах и на регулирующих элементах.

4 Построение геометрической модели и подготовка расчёта

Задачей в работе является проведение предварительного гидравлического расчёта гидравлического привода с магнитореологическим управлением, включая моделирование элементов регулирования (МРД), входных и сливных каналов, определение характеристик течения жидкости в камере высокого давления, каналах и элементах управления, таких как скорость потока жидкости и среднее давление по сечению канала.

Модель была подготовлена в программе для 3D-моделирования Rhinoceros 7 (Robert McNeel & Associates (TLM, Inc.), USA). По-

лученная модель внутренних каналов привода представлена на рисунке 3.

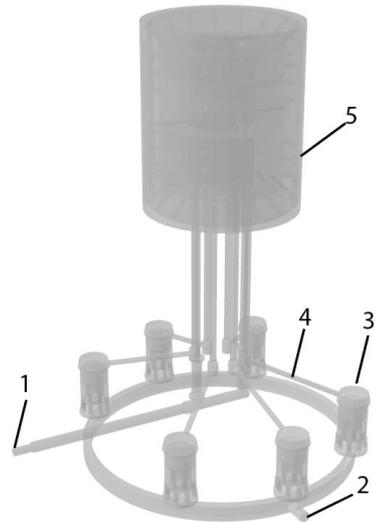


Рисунок 3. Внутренняя полость каналов гидравлического привода

1 – входной канал; 2 – сливной канал; 3 – МРД; 4 – выходной канал МРД; 5 – гидростатическая опора

При построении трёхмерной модели были приняты следующие упрощения и допущения:

1. Форма концентраторов магнитной индукции в МРД [9] не моделировалась, поскольку они залиты изолятором и не оказывают влияния на движение потока жидкости;
2. С целью упрощения проведения расчёта принято допущение, что гидростатическая опора остаётся неподвижной и привод находится в равновесном состоянии;
3. Каналы, не участвующие в движении МРЖ (отверстия для центрирования деталей, отдушина и пр.), не моделировались, поскольку они не оказывают влияния на расчёт.

Наиболее ответственным элементом, определяющим дальнейшее течение жидкости, и, соответственно, основные технические характеристики привода, является МРД. Форма его внутренних каналов представлена на рисунке 4. МРЖ поступает в кольцевой канал, откуда в дальнейшем распределяется между шестью МРД.

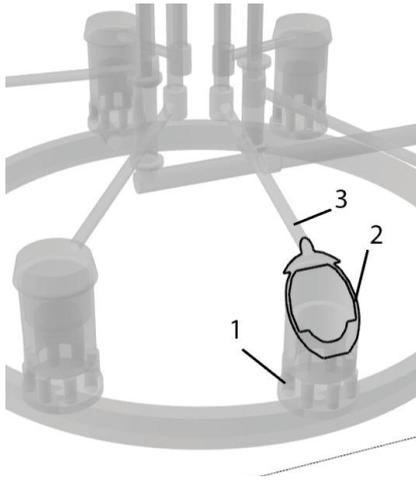


Рисунок 4. Внутренняя полость МРД
1 – входной канал МРД; 2 – технологический зазор; 3 – выходной канал МРД

Проводимое исследование направлено на оценку равномерности распределения давления в каналах. Моделирование потока МРЖ проведено в «пассивном» состоянии, без внешнего магнитного поля, что примерно соответствует поведению жидкости носителя. Для моделирования МКЭ использована программа Comsol Multiphysics 6.1 (COMSOL LLC, Sweden).

Также с целью упрощения было принято решение провести моделирование гидравлической системы при условии ламинарного течения. В связи с большим количеством сужений и расширений каналов характер течения МРЖ носит турбулентный характер, однако данное приближение было принято считать допустимым для предварительного исследования, предназначенного для оценки равномерности распределения давления в каналах, поскольку это позволяет значительно снизить нагрузку на вычислительную систему.

Граничными условиями для проведения расчёта являются входное и выходное значения давления. Граничные условия представлены в таблице 1.

В качестве материала применяется базовый материал из библиотеки Comsol “Engine Oil”.

Поскольку параметры жидкости зависят от давления, температуры и иных факторов, они задаются внутренними графиками. Ис-

пользование данного материала также является допущением.

Таблица 1. Граничные условия расчёта

Параметр	Начальная точка	Конечная точка	Шаг изменения
Входное давление, атм.	2	6	0,5
Выходное давление, атм.	0	0	–

Сетка конечных элементов создаётся в соответствии с физикой исследования согласно внутренним алгоритмам программы. Дополнительным указанием программе при формировании сетки было повышенное качество сетки (рисунок 5).

Для верификации результатов проведён анализ сетки конечных элементов. Сведения о качестве сетки представлены в таблице 2. В рамках данного исследования качество сетки признаётся приемлемым.

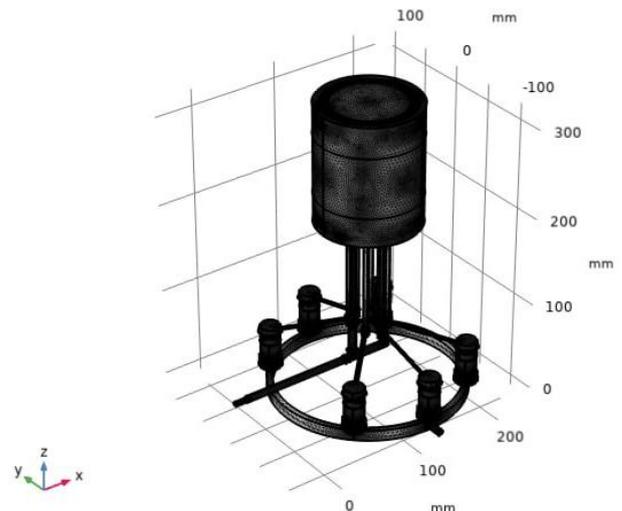


Рисунок 5. Сетка конечных элементов

Таблица 2. Основные параметры сетки конечных элементов

Параметр	Величина
Количество элементов	2300931
Минимальное качество элемента	0,2532
Среднее качество элементов	0,6562

5 Обработка результатов исследования

Полученные результаты гидравлического расчёта, представленные на рисунках 6 и 7, позволяют оценить распределение скорости потока жидкости и давления в системе.

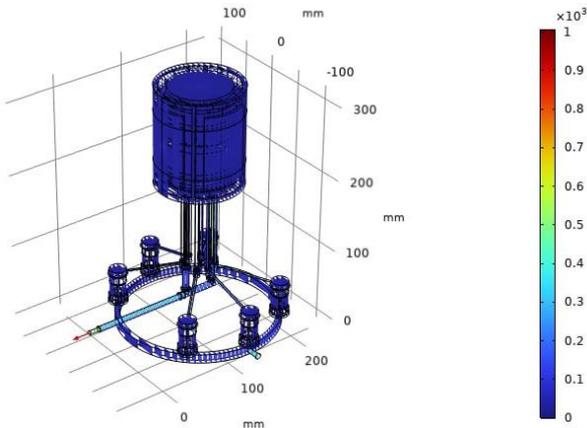


Рисунок 6. Визуализация распределения скорости (мм/с) при входном давлении 2 атм.

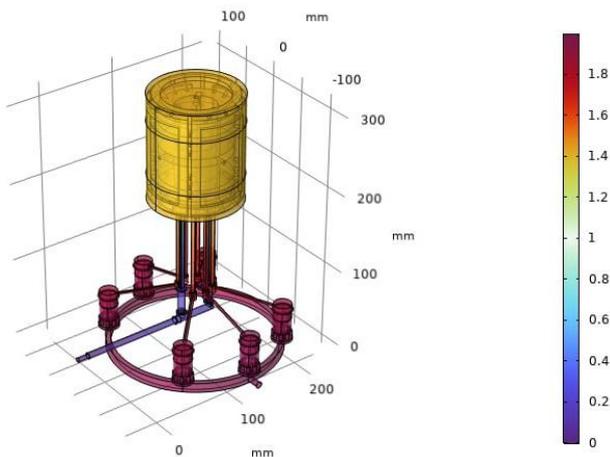


Рисунок 7. Визуализация распределения давлений (атм.) при входном давлении 2 атм.

Для анализа построены секущие плоскости, параллельные плоскости XY, которые представлены на рисунке 8. Значения давлений и скорости в секущих плоскостях представлены на рисунке 9.

Для проведения анализа значения давлений в сечении канала аппроксимировались. Полученные в результате обработки графики представлены на рисунке 10. Сравнение проводилось между двумя дросселями, один из которых расположен наиболее близко к

входному каналу, а второй наиболее удалён от него.

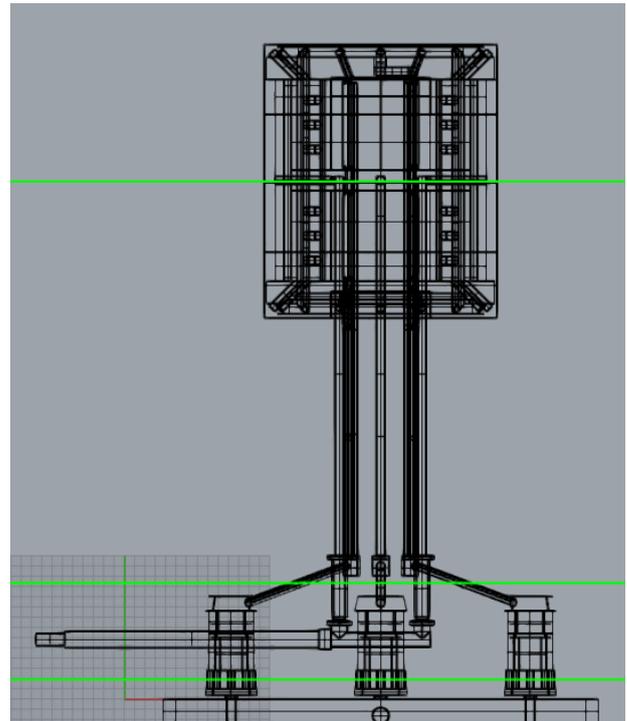


Рисунок 8. Секущие плоскости

В результате анализа выявлено неравномерное распределение потока между МРД. Давление в наиболее близком к входному каналу дросселе ожидается выше, чем давление в наиболее удалённом. Различия увеличиваются при повышении входного давления. Так, наибольшая разность давлений на входе в дроссели составила 13,7 кПа. Неравномерность распределения потока МРЖ означает смещение гидростатической опоры в начальный момент времени в сторону рабочего объёма с меньшим давлением. Как следствие, возникают дополнительные особенности регулирования подобной системы.

Согласно полученным результатам, давление в камерах высокого давления гидростатической опоры, лежащих на одной оси перемещения, выровнялось, несмотря на неравномерность распределения потока МРЖ, и составило 0,425 МПа по оси X и 0,440 МПа по оси Y при входном давлении 0,6 МПа. Это связано с принятым допущением о неподвижности гидростатической опоры, а также указывает на то, что гидравлическое сопротивление МРД и каналов,

подводящих МРЖ, составило от 0,160 Мпа до 0,175 Мпа.

Падение давления на МРД также зависит от входного давления в систему, что можно наблюдать на графике 10, а. Зависимость давления на входе и выходе МРД показана на графиках 10, б и носит линейный характер в связи с тем, что расчёт проводился для ламинарного потока.

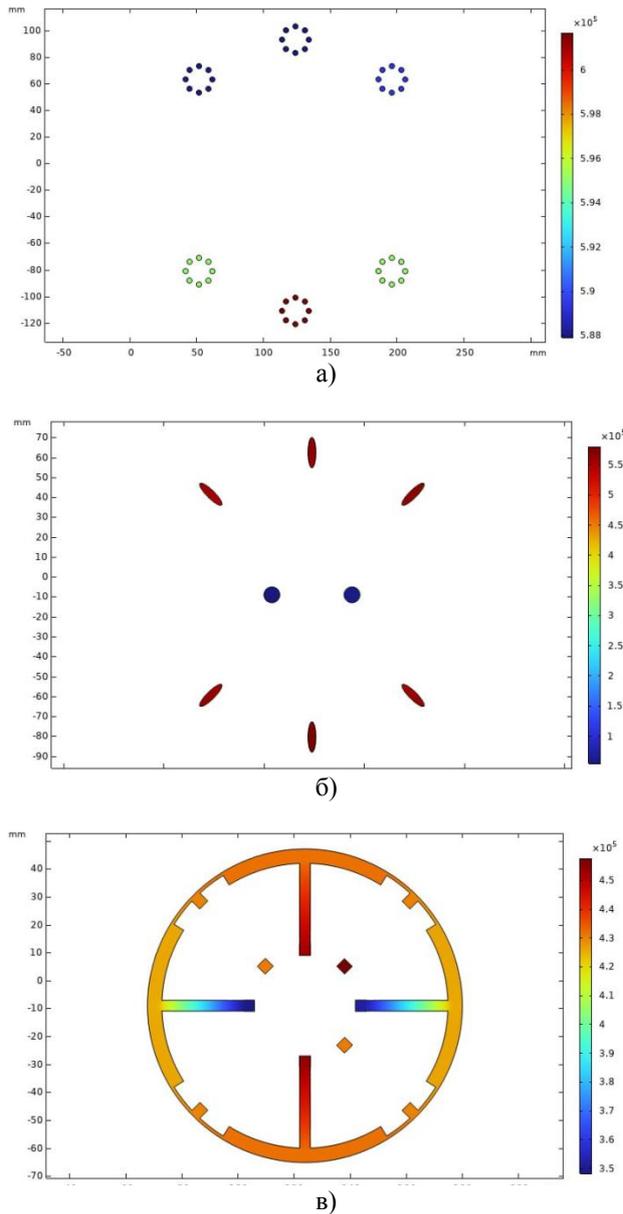


Рисунок 9. Распределение давлений (атм.) в секущих плоскостях при входном давлении 6 атм.
 а) на входе в МРД; б) на выходе МРД;
 в) в середине гидростатической опоры

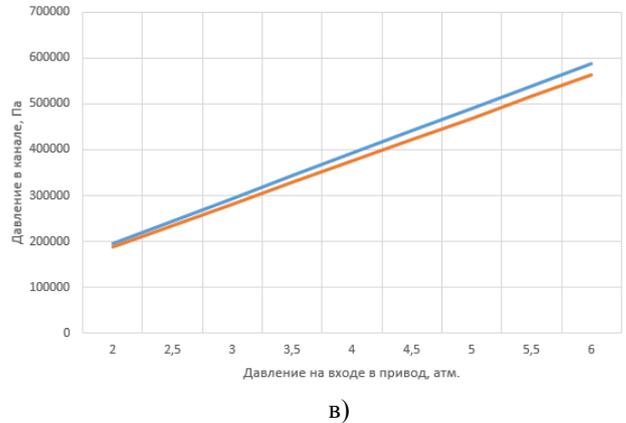
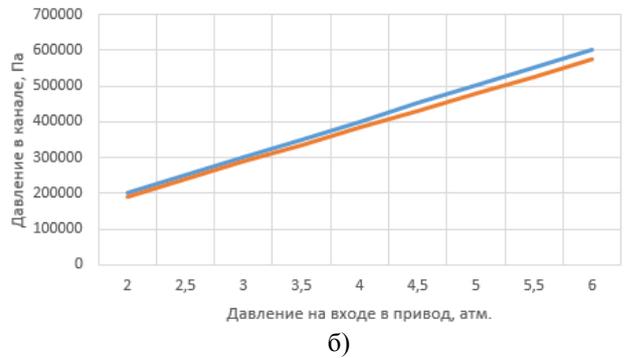
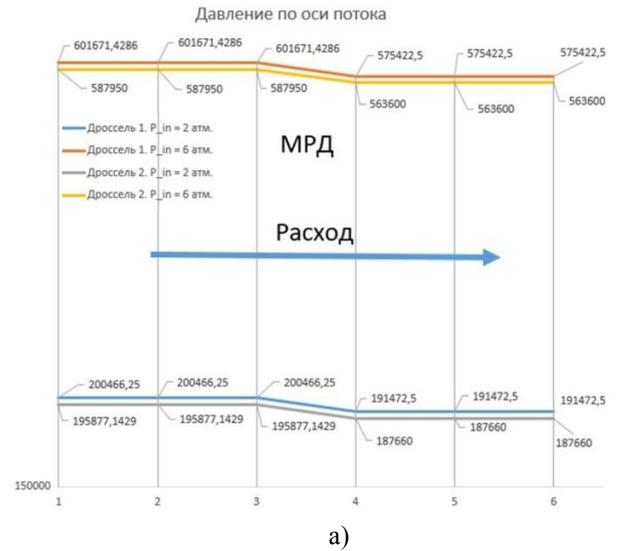


Рисунок 10. Характеристические зависимости давления на МРД
 а) график падения давления на МРД; б) МРД возле входного канала; в) МРД, удалённый от входного канала (синяя линия – давление на входе, оранжевая – давление на выходе);

6 Выводы

1. Выходные характеристики перемещения гидравлического привода, основанного на МРД, такие как погрешность позицио-

нирования, постоянная времени, перерегулирование, определяются гидравлическими характеристиками управляющего элемента, МРД, структурой гидравлической системы привода в целом и его отдельных элементов. Влияние оказывают такие параметры, как гидравлическое сопротивление, перепад давлений, равномерность распределения потока.

2. Магнитореологическая жидкость относится к неньютоновским жидкостям, однако в отсутствие внешнего магнитного поля её поведение соответствует нормальному поведению жидкости-носителя, что говорит о возможности предварительного моделирования и расчёта гидравлических систем с магнитореологическим управлением классическими методами.

3. Разработанная модель внутренних полостей гидравлического привода позволяет провести комплексный расчёт гидравлической системы с учётом напорной и сливной магистралей, включая влияние внешнего магнитного поля на характеристики протекающей МРЖ.

4. Показано, что падение давления на МРД линейно зависит от входного давления в гидравлическую систему, что вызвано принятым допущением о ламинарности потока в гидросистеме.

5. Исследование расходных характеристик гидравлического привода показало неравномерность распределения потока МРЖ. Максимальная разность между давлениями на МРД при входном давлении в 6 атм составляет 13,7 кПа, что говорит о необходимости корректировки управляющих сигналов на трёх дросселях из шести в момент пуска гидравлической системы.

7 Заключение

Предварительный гидравлический расчёт привода точных перемещений на основе гидростатической опоры МКЭ позволил выявить существующую неравномерность распределения потока МРЖ в системе, что говорит о необходимости корректировки управляющих сигналов САУ при пуске сис-

темы или внесении изменений в конструкцию.

Проведённый анализ может быть в дальнейшем использован при моделировании процесса регулирования привода, исследовании динамических характеристик МРД, а имеющиеся результаты могут быть использованы при конструировании вновь разрабатываемых устройств с магнитореологическим управлением.

Список использованных источников

- [1] Eshgarf, H., An overview on properties and applications of magnetorheological fluids: Dampers, batteries, valves and brakes / H. Eshgarf, A. Ahmadi Nadooshan, A. Raisi // *Journal of Energy Storage*, 2022. – v. 50, 104648. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104648>
- [2] Vishwakarma, P. N., Characterization of a magnetorheological fluid damper a review / P. N. Vishwakarma, P. Mishra, S. K. Sharma // *Materials Today: Proceedings*. 2022. – v. 56. – С. 2988–2994.
- [3] Kumar, M. A review on rheological properties of magnetorheological fluid for engineering components polishing / M. Kumar, A. Kumar, R. Kumar Bharti, H. N. Singh Yadav, Das M. // *Materials Today: Proceedings*, 2022. – v. 56. – С. A6–A12.
- [4] Li, J. Multi-stage hysteresis modelling of magnetorheological dampers and experimental verification / J. Li, C. Liao, L. Xie, X. Wei // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023. v. 254. С. 108435.
- [5] Hu, G. Design and performance evaluation of a magnetorheological valve with mosquito-coil-plate fluid flow channels / G. Hu, H. Qi, K. Zheg, Y. Lifan // *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022. – v. 347. – С. 113983.
- [6] Huang, B. L. Force Feedback Based on Magnetorheological Fluid / B.L. Huang, W.D. Zhan, W. T. Hu, Y. F. Tang // *Procedia Computer Science*, 2020. – v. 166. – С. 15–20.
- [7] Liang, Z. Influence of uncertainty factors on the dynamic characteristics of magnetorheological damper / Z. Liang, F. Yongbao, W. Xiaolin, Z. Zhenhua // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023. – v. 585. – С. 171125.
- [8] Eugeny, A. Deouline Control of adaptive optic element displacement with the help of a magnetic rheology drive / Deouline A. Eugeny, V. P. Mikhailov, V. V. Sytchev // *Proc. SPIE 4231, Advanced Optical Manufacturing and Testing Technology*, 2000. – 6 October.
- [9] Шелковский, М. А. Повышение эффективности работы магнитореологического дросселя за счёт подбора геометрических параметров его зазора / М. А. Шелковский, А. М. Базиненков, А. К. Шагимура-това // *Динамика и виброакустика*, 2023. - Т. 9. – №2. – С. 25-33. DOI: 10.18287/2409-4579-2023-9-2-25-33

RESEARCH OF THE FLOW CHARACTERISTICS OF A HYDRAULIC DRIVE BASED ON A HYDROSTATIC SUPPORT WITH MAGNETORHEOLOGICAL CONTROL

Shelkovyy M.A.
Bazinenkov A.M.

Bauman Moscow State University

2nd Baumanskaya st, 5, b 4,
Moscow, 105005,
Russian Federation

shma18t387@student.bmstu.ru

A hydraulic drive with magnetorheological control is an effective solution when it is necessary to ensure precise positioning of a massive object. The magnetorheological drive is capable of positioning an object weighing up to 100 kg with an error of up to 50 nm. The dynamic characteristics of the working fluid flow in various sections of the pipeline determine the technical characteristics of the device as a whole.

In this paper, the hydraulic characteristics of the drive are studied by the finite element method under laminar flow conditions. A study of the pressure at the inlet and outlet of the magnetorheological throttle showed that the pressure drop ranges from 8.2 kPa to 26.2 kPa, depending on the pressure at the inlet of the hydraulic system and the location of the throttle. The fluid flow velocity in the technological gap was 1 m/s in the center of the channel and allows us to evaluate the behavior of the drive at various operating pressures, as well as subsequently carry out a complete modeling of the system to implement the mechanism control system.

Keywords: magnetorheological fluid; hydraulic drive; magnetorheological throttle; working gap; finite element method; fluid flow; pressure drop

References

- [1] Eshgarf, H., Nadooshan, A.A. and Raisi, A. (2022), "An overview on properties and applications of magnetorheological fluids: Dampers, batteries, valves and brakes", *Journal of Energy Storage*, v. 50, p. 104648. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104648>.
- [2] Vishwakarma, P.N., Mishra, P.K. and Sharma, S.C. (2022), "Characterization of a magnetorheological fluid damper a review", *Materials Today: Proceedings*, v. 56, pp. 2988–2994, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.143>.
- [3] Kumar, M., Kumar, A., Kumar Bharti, R., Yadav, H.N.S. and Das, M. (2022), "A review on rheological properties of magnetorheological fluid for engineering components polishing", *Materials Today: Proceedings*, 56, pp. A6–A12. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.611>.
- [4] Li, J., Liao, C., Xie, L., Wei, X., Du, X., Gan, B. and Shou, M. (2023), "Multi-stage hysteresis modelling of magnetorheological dampers and experimental verification", *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 254, p. 108435. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108435>.
- [5] Hu, G., Qi, H., Zheng, K. and Yu, L. (2022), "Design and performance evaluation of a magnetorheological valve with mosquito-coil-plate fluid flow channels", *Sensors and Actuators A: Physical*, 347, p. 113983. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113983>.
- [6] Huang, B.L., Zhan, W.D., Hu, W.T. and Tang, Y. F. (2020), "Force feedback based on magnetorheological fluid", *Procedia Computer Science*, v. 166, pp. 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.005>.
- [7] Zhen, L., Xiaolin, W. and Zhenhua, Z. (2023), "Influence of uncertainty factors on the dynamic characteristics of magnetorheological damper", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 585, p. 171125. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171125>.
- [8] Deouline, E.A., Mikhailov, V.P. and Sytchev, V.V. (2000), "Control of adaptive optic element displacement with the help of a magnetic rheology drive", *Proceedings of SPIE [Preprint]*. <https://doi.org/10.1117/12.402755>.
- [9] Shelkovyy, M.A., Bazinenkov, A.M. and Shagimuratova, A.K. (2023), "Efficiency improvement of magnetorheological valve through geometric parameter variation of technological gap", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, V. 9, N. 2, pp. 25-33. DOI: 10.18287/2409-4579-2023-9-2-25-33. (in Russian)