

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ДРОССЕЛЯ ЗА СЧЁТ ПОДБОРА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЕГО ЗАЗОРА

Шелковый М.А.
Базиненков А.М.
Шагимуратова А.К.

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

Магнитореологические жидкости являются эффективным решением для использования в качестве рабочей жидкости в устройствах вибрационной защиты и прецизионных перемещений. Магнитореологический привод способен обеспечить прецизионное позиционирование объекта массой до 100 кг с погрешностью до 50 нм. Ключевой характеристикой основного управляющего элемента, магнитореологического дросселя, является создаваемое в рабочем зазоре магнитное поле. Исследование индукции магнитного поля в технологическом зазоре дросселя методом конечных элементов позволило определить наилучшее сочетание геометрических параметров концентраторов магнитного поля (зубьев) с точки зрения максимума магнитной индукции в зазоре, составившей 1,4 Тл. Повышение индукции в зазоре позволит повысить эффективность регулирования потока жидкости дросселем, а также точность и быстродействие привода.

Ключевые слова: магнитореологическая жидкость; гидравлический привод; магнитореологический дроссель; рабочий зазор; метод конечных элементов

1 Введение

Современные машиностроительные технологии зачастую выдвигают особые требования к материалам, которые могут быть обеспечены применением «смарт»-материалов, способных обратимо менять свои свойства при внешнем воздействии. Среди таких материалов выделяют магнитореологические и магнитные жидкости.

Магнитореологические жидкости (МРЖ) являются растворами и относятся к классу золей, поскольку размер частиц находится в диапазоне от 1 до 100 мкм. Особенностью МРЖ является резкое увеличение локальной вязкости при воздействии внешнего магнитного поля.

Магнитными жидкостями являются растворы с характерным размером частиц магнетика менее 1 мкм. Они проявляют слабый магнитореологический эффект и не применяются в механизмах перемещений и виброизоляции.

2 Магнитореологические жидкости

В состав магнитореологических жидкостей входят: частицы магнетика с характерным размером частиц от 1 до 100 мкм; жидкостеноситель; поверхностно-активное вещество (ПАВ), призванное стабилизировать частицы магнетика; тиксотропное средство для увеличения вязкости МРЖ в состоянии покоя и уменьшения при механическом воздействии.

В качестве дисперсной фазы выступают магнитные частицы, в качестве среды – органические растворители или вода, содержащая стабилизатор для повышения устойчивости системы. Для стабилизации магнитных частиц применяют поверхностно активные вещества (ПАВ), которые хорошо адсорбируются на поверхности частиц и имеют химическое сродство к дисперсионной среде [1].

Гидродинамические процессы в магнитореологической жидкости описываются уравнением Навье-Стокса [2]:

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} v_i - M_j \frac{\partial H_j}{\partial x_i} + K_i,$$

где v_i – проекция вектора скорости v магнитной жидкости на ось x_i ; η – сдвиговая вязкость; K_i – проекция внешней силы на ось x_i . Уравнение Навье-Стокса позволяет описать движение вязкой ньютоновской жидкости. В ряде работ рассматривается модифицированное уравнение, позволяющее описать движение МРЖ в магнитном поле.

В зависимости от состава магнитореологической жидкости они могут соответствовать различным реологическим моделям, описывающим зависимость напряжения сдвига от скорости деформации сдвига. Для магнитореологических жидкостей применимы следующие модели [3,4]:

1. Модель Бингама, описывающая жидкости, содержащие крупные коллоидные частицы и схожие по структуре с масляными красками;

2. Модель Гершеля-Балкли, применимая для описания вязкопластичных структурированных дисперсных систем;

3. Модель Кассона, применимая для расчёта дисперсных систем, схожих с типографическими и масляными красками, кро-ви, эластомеров и других систем;

4. Модель Бингама-Папанастасиу, описывающая течения агрегированных суспензий, примером которого является течение в илестых реках.

Механическая модель Бингама состоит из элементов Гука с модулем упругости G , Ньютона с вязкостью η и Сен-Венана с пределом текучести τ_T . Скорость деформации сдвига $\dot{\gamma}$ описывается уравнением:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{(\tau - \tau_T)}{\eta}$$

Модель Гершеля-Балкли – степенная модель описания реологических жидкостей. В отличие от модели Бингама соотношение между напряжением и скоростью деформации сдвига не является линейным. Модель описывается уравнением:

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n.$$

Для описания процессов пластического течения, при котором не наблюдается пропорциональной зависимости между скоростью деформации сдвига и напряжением, применяется модель Кассона. При достижении предела текучести структура разрушается не сразу, а постепенно, по мере увеличения градиента скорости. Модель описывается уравнением:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_K} + \sqrt{\eta_K \cdot \dot{\gamma}},$$

где τ_K – предельное напряжение по Кассону, η_K – пластическая вязкость по Кассону.

Особенностью модели Бингама-Папанастасиу является непрерывная регуляция функции вязкости, благодаря параметру m , контролирующему экспоненциальный рост напряжения и имеющему размерность времени. Модель описывается уравнениями:

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-m\dot{\gamma}}) + \mu \dot{\gamma},$$

$$\eta = \mu + \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} (1 - e^{-m\dot{\gamma}}).$$

Рассмотренные модели описывают поведение жидкости, опираясь на основные её физические свойства, такие как модуль сдвига, вязкость и предел текучести. С увеличением внешнего магнитного поля эти свойства изменяются, в частности модуль сдвига значительно возрастает вплоть до момента насыщения частиц наполнителя. Величина модуля сдвига определяет предельное давление, которое МРЖ способна удерживать в качестве рабочей жидкости гидравлической системы. Таким образом, для повышения эффективности управления гидравлическими механизмами на основе МРЖ необходимо обеспечить максимальную величину внешнего магнитного поля, действующего на МРЖ.

3 Применение МРЖ

В настоящее время МРЖ нашли широкое применение в технике в связи со способностью локального изменения вязкости и напряжения сдвига. В частности, МРЖ показали свою эффективность в применении в конструкции промышленных амортизаторов [5]. Применение МРЖ позволило увеличить тормозную силу амортизатора в 4 раза за счёт изменения характеристик жидкости при приложении внешнего магнитного поля.

Применение МРЖ в качестве рабочей жидкости гидравлических систем привело к созданию ряда устройств, призванных регулировать или ограничивать поток жидкости. В патенте [6] описано несколько устройств, основанных на МРЖ, среди которых можно выделить два устройства: пневмогидравлическое устройство позиционирования и пневмогидравлический привод. Их отличительной особенностью является наличие в конструкции магнитореологического дросселя, который обеспечивает высокую точность перемещения за счёт широкого диапазона регулирования.

4 Описание конструкции объекта исследований

В работе проводится исследование магнитореологического дросселя (МРД) гидравлического привода на основе гидростатической опоры, представленного на рисунке 1.

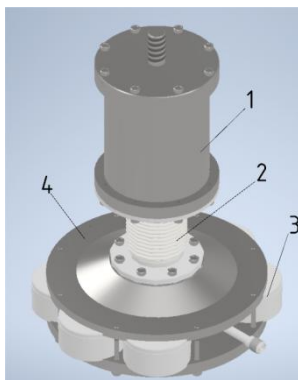


Рисунок 1. Магнитореологический привод
1 – подвижная часть; 2 – сильфон; 3 – МРД; 4 – неподвижная часть

Поток жидкости в камеру высокого давления привода регулируется за счёт магнитного поля, создаваемого электромагнитной системой МРД. Основным преимуществом привода является высокая точность позиционирования с погрешностью перемещения до 50 нм. Высокая точность достигается за счёт отсутствия в конструкции инерционных элементов управления потоком жидкости.

Конструкция МРД представлена на рисунке 2 и включает в себя корпус МРД 4, на центральной части которого выполнены зубья, являющиеся концентраторами магнитного потока, резиновое уплотнение 3 и крышку 1. Между крышкой и корпусом МРД создаётся технологический зазор 5, через который протекает МРЖ. МРД представляет собой магнитную цепь на основе броневого сердечника.

Концентраторы используются для локального увеличения магнитной индукции магнитного поля в рабочем зазоре.

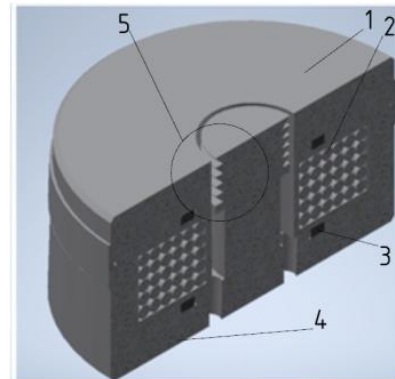


Рисунок 2. Магнитореологический дроссель
1 – крышка МРД; 2 – катушка индуктивности; 3 – резиновое уплотнение; 4 – корпус; 5 – технологический зазор

Принцип действия МРД основан на способности МРЖ локально изменять 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. Герметизация дросселя осуществляется за счёт двух резиновых уплотнений.

За счёт катушек индуктивности в зазоре создаётся магнитное поле, вынуждающее частицы магнетика МРЖ выстраиваться в линии и структуры, за счёт чего расход жидкости снижается. Принцип работы МРД представлен на рисунке 3.

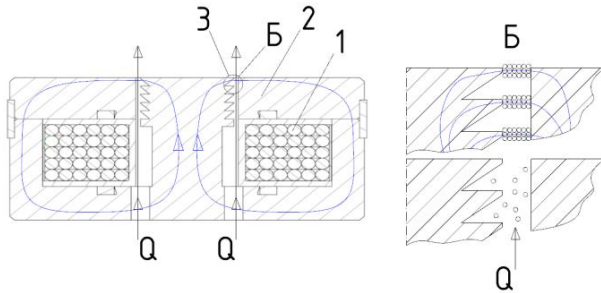


Рисунок 3. Схема магнитореологического дросселя

1 – катушка индуктивности; 2 – магнитопровод; 3 – технологический зазор

Очевидно, что чем больше величина поля в зазоре, тем больше эффективность управления потоком МРЖ. Значением магнитной индукции в технологическом зазоре можно управлять, изменяя величину силы тока, подаваемой на катушку. Однако увеличение магнитной индукции ограничивается допустимым током.

Другим методом увеличения магнитной индукции является увеличение числа витков катушки, однако корпус дросселя имеет габаритное ограничение, обусловленное конструкцией привода. Уменьшение диаметра сечения проволоки витков также приводит к уменьшению допустимого тока или перегреву устройства.

Геометрия концентраторов магнитного потока также оказывает значительное влияние на величину индукции в пределах рассматриваемого технологического зазора. Изменение конструкции зубьев дросселя не приводит к изменению габаритов устройства. Единственным накладываемым ограничением на модернизацию зубьев является необходимость сохранения величины технологического рабочего зазора 1 мм.

5 Построение геометрической модели и подготовка расчёта

Поскольку единственным возможным методом увеличения максимальной величины магнитной индукции в зазоре является изменение конструкции концентраторов магнитного потока, было принято решение провести расчёт методом конечных элементов (МКЭ) в программе Comsol Multiphysics.

С целью увеличения скорости проведения расчётов было принято решение упростить модель. Упрощённая модель представлена на рисунке 4.

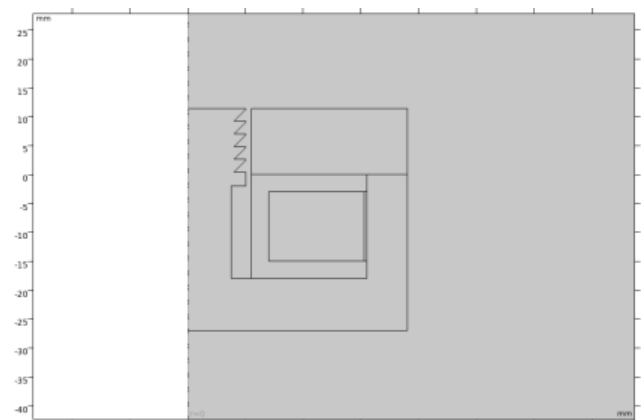


Рисунок 4. Расчётная модель МРД

Главным упрощением является построение осесимметричной 2D модели. Поскольку элементы дросселя являются телами вращения, такое упрощение не оказывает влияния на результаты расчёта.

Расчёт данной конструкции необходимо выполнять только в трёхмерной модели. Ввиду малого размера каналов и их большого количества, а также необходимости подробного разбиения сеткой, расчёт будет занимать длительное время и значительные ресурсы компьютера. Поэтому в процессе построения модели было принято решение отказаться от моделирования входных отверстий дросселя.

Удаление отверстий позволяет свести задачу к плоской осесимметричной модели, значительно снижающей требования к аппаратной части компьютера. Аналогично было принято решение не моделировать резиновые уплотнения для упрощения расчёта.

Целью исследования является повышение магнитной индукции в технологическом зазоре дросселя, в связи с чем наилучшим решением считается такое решение, при котором индукция в зазоре достигает максимального значения из всех рассмотренных случаев. Для выявления такой конструкции необходимо было варьировать геометрические параметры зубьев. Для полного определения геометрии зубьев необходимо введение 3 параметров: высоты профильной канавки, высоты зуба и угла профильной канавки. Варьируемые параметры, шаг и диапазон варьирования представлены в таблице 1 и на рисунке 5.

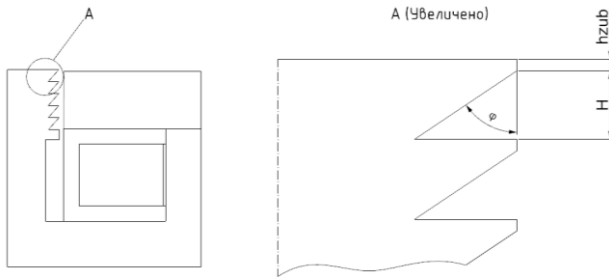


Рисунок 5. Варьируемая геометрия

Таблица 1. – Диапазон варьируемых параметров

Параметр	Начальная точка	Конечная точка	Шаг
Высота профильной канавки, H , мм	1	3	0,25
Высота зуба, h_{zub} , мм	0,1	0,3	0,025
Угол профильной канавки, ϕ , [deg]	45	65	5

Для проведения расчёта необходимо задать граничные условия. Материалом магнитопровода является сталь 20. В качестве изолятора витков обмотки использована эпоксидная смола, изолирующая катушку индуктивности от магнитопровода. Остальное пространство задаётся воздухом. Материалом катушки выбрана медь. Характеристики назначенных материалов представлены в таблице 2.

После задания материалов определяются исходные данные, представленные в таблице 3.

Таблица 2. – Характеристики назначенных материалов

Материал	Относительная проницаемость	Относительная диэлектрическая проницаемость	Электрическая проводимость
Медь	1	1	6,998e7
Магнитомягкое железо	Кривая нормы магнитного поля	1	1,12e7
Воздух	1	1	0
Эпоксидная смола	1	1	0

Таблица 3. – Исходные данные

Параметр	Величина
Ток в катушке, I	2 А
Число витков в катушке, n	830 шт.
Число зубьев, N_{zub}	5 шт.
Диаметр провода катушки, d_{coil}	0,6 мм

Сетка конечных элементов, принятая в исследовании, создается автоматически согласно внутренним алгоритмам программы и представлена на рисунке 6. Сетка мельче в районе зубьев МРД, поскольку они являются концентраторами магнитного потока.

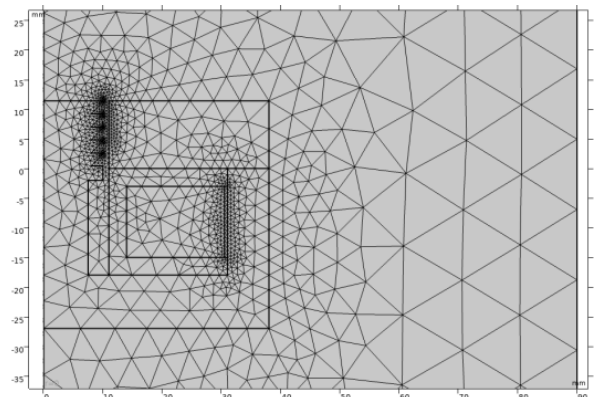


Рисунок 6. Сетка конечных элементов

С целью верификации результатов проведён анализ качества сетки конечных элементов. Количество, размер и форма элементов могут оказать значительное влияние на проводимый расчёт и привести к недостоверным результатам. Значение 1 является наилучшим из возможных и указывает на оптимальный элемент в контексте выбранной оценки качества. Значение 0 представляет

вырожденный некачественный элемент. В данной работе оценка качества элементов основана на оценке изменения изогональности элемента. Гистограмма распределения качества элементов сетки представлена на рисунке 7, а основные параметры сетки в таблице 4. Гистограмма позволяет визуально оценить количество элементов сетки желаемого качества. Качество сетки признается удовлетворительным для проведения расчёта.

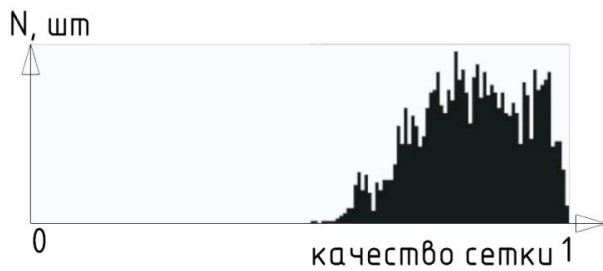


Рисунок 7. Гистограмма распределения качества элементов сетки

Таблица 4. – Основные параметры сетки конечных элементов

Параметр	Величина
Количество элементов	2397
Минимальное качество элемента	0,5243
Среднее качество элементов	0,8192

6 Обработка результатов исследования

В результате исследования были сформированы 585 комбинаций геометрических параметров. Для каждой комбинации проведён расчёт магнитной системы. Визуализация одного из них представлена на рисунке 8.

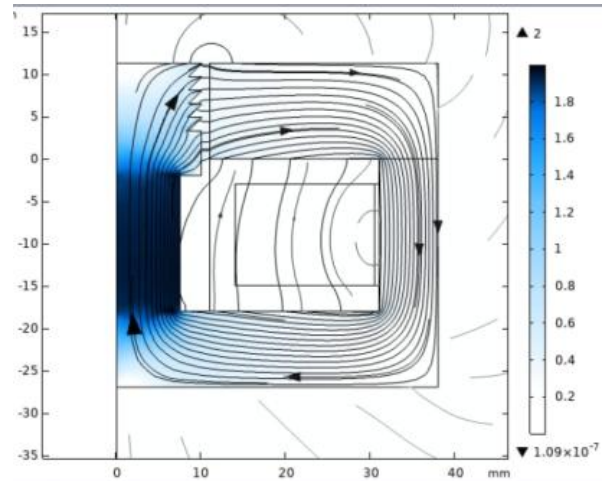


Рисунок 8. Двумерная визуализация решения

Для определения величины индукции магнитного поля в технологическом зазоре были построены 3 секущие плоскости, представленные на рисунке 9. Графики распределения индукции при различных решениях представлены на рисунке 10.

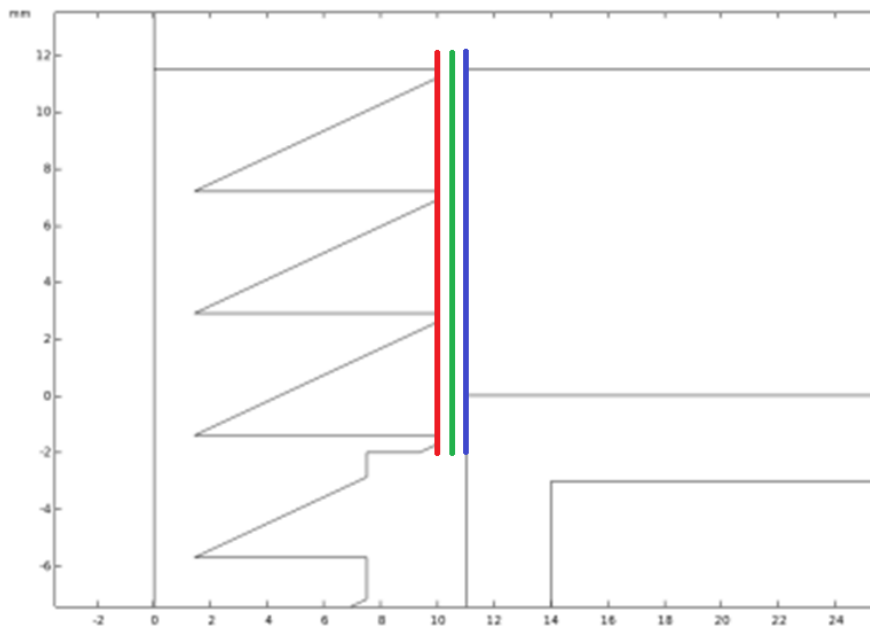


Рисунок 9. Секущие плоскости: возле зубьев (красная линия); в середине технологического зазора (зелёная линия); в) на плоскости магнитопровода (синяя линия)

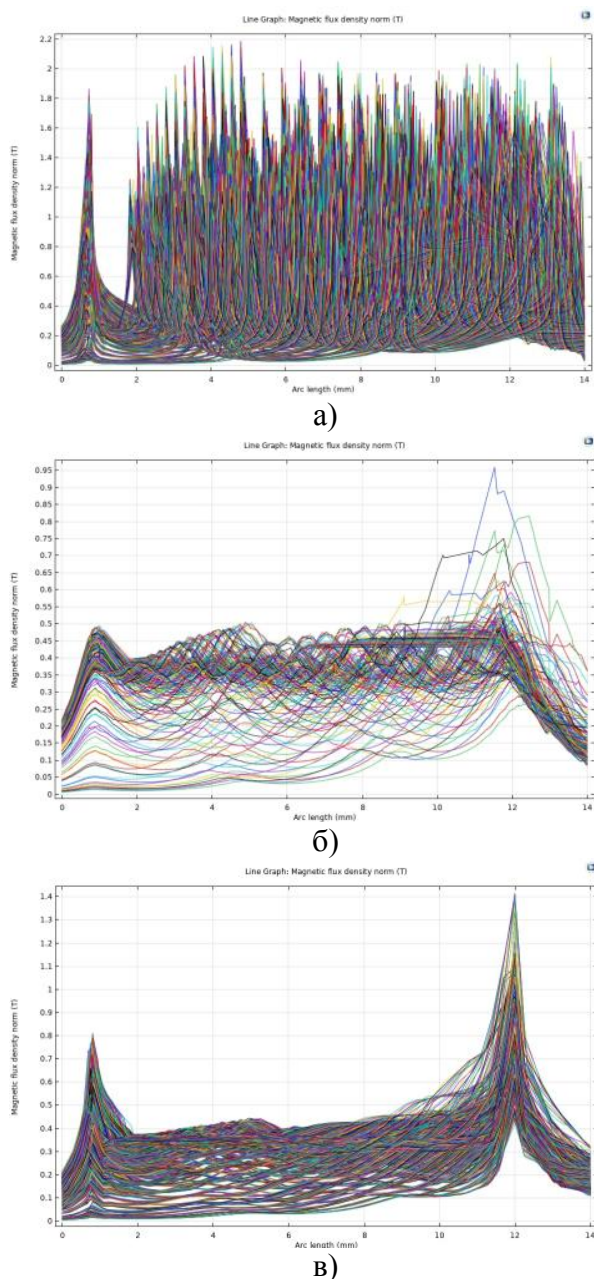


Рисунок 10. Магнитная индукция вдоль секущих плоскостей

а) возле зубьев; б) в середине технологического зазора; в) на плоскости магнитопровода

Для выбора лучшей конструкции были рассмотрены графики распределения магнитной индукции для стандартной конструкции дросселя, представленные на рисунке 11.

В результате анализа, было отобрано несколько решений, при которых индукция магнитного поля максимальна. В дальнейшем решения сравнивались попарно и с оригинальной геометрией зубьев, а также про-

водился анализ реализуемости конструкции. Конструкция признавалась реализуемой, если концентраторы магнитной индукции вмещались на шейке $\varnothing 20$ мм на протяжении всего технологического зазора. В итоге было выбрано одно решение, признанное наилучшим (рисунок 12).

Изменение конструкции зубьев привело к повышению величины магнитной индукции на поверхности вершин зубьев и на плоскости магнитопровода на 0,1 и 0,05 Тл соответственно.

7 Выводы

1 Полученное распределение магнитной индукции в технологическом зазоре дросселя для 585 различных вариантов конструкции зубьев дросселя позволило оценить влияние геометрических параметров на величину магнитного поля в зазоре;

2 Изменение геометрии зубьев зазора МРД позволило увеличить магнитную индукцию магнитного поля с 1,3 до 1,4 Тл в технологическом зазоре, что соответственно приведёт к увеличению эффективности регулирования;

3 Магнитореологический привод является перспективным механизмом прецизионного перемещения, поскольку способен обеспечить перемещения с погрешностью до 50 нм при максимальной нагрузке до 100 кг.

8 Заключение

Применение МРЖ в технике и устройствах виброизоляции является перспективным направлением, поскольку позволяет увеличить эффективность рассеивания вибраций, а также позволяет исключить инерционные механические регуляторы.

Моделирование магнитной индукции в технологическом зазоре магнитореологического дросселя, являющегося ключевым элементом конструкции гидравлического привода, позволило выбрать решение, которое признаётся лучшим с точки зрения максимизации величины индукции магнитного поля.

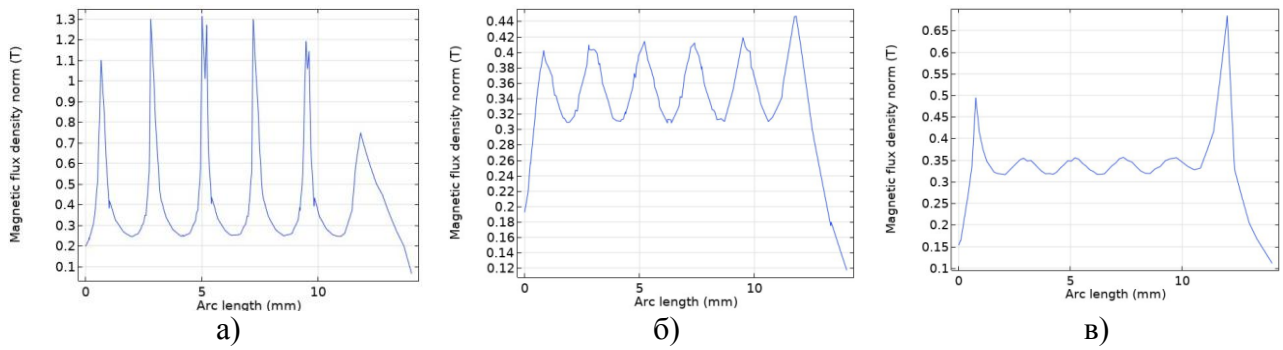


Рисунок 11. Магнитная индукция вдоль секущих плоскостей при изначальной конструкции МРД
 а) возле зубьев; б) в середине технологического зазора; в) на плоскости магнитопровода

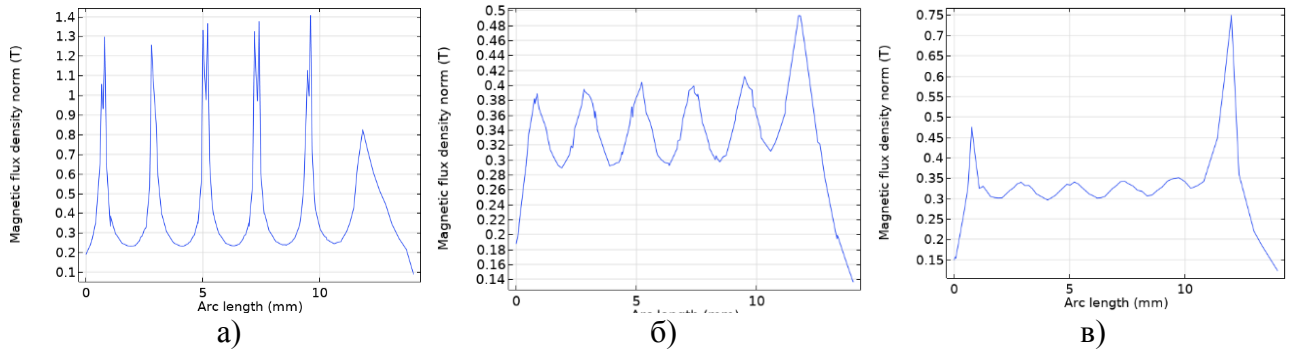


Рисунок 12. График распределения магнитной индукция вдоль технологического зазора
 а) на поверхности вершин зубьев; б) в середине технологического зазора;
 в) на плоскости магнитопровод

Список использованных источников

[1] Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение: монография / Е. С. Беляев [и др.] ; под ред. А. С. Плехова. – Нижегород. гос. техн. ун-т им. П.Е. Алексеева, 2017. – 94 с.

[2] Найгерт, К.В. Прикладные свойства магнитореологических жидкостей : учебное пособие [Электронный ресурс] / К. В. Найгерт, В. А. Целищев // Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2021. – URL: https://ugatu.ru/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-81.pdf

[3] Бондаренко, М. Э. Краткий обзор подходов к моделированию магнитореологических жидкостей / М. Э. Бондаренко, А. С. Фетисов, А. Ю. Бабин, В. О. Тюрин // XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2018) : Сборник трудов конференции, Москва, 20–23 ноября 2018 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения

им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2019. – С. 236-239.

[4] Barnes, H.A. A Handbook of Elementary Rheology / H. A. Barnes. – Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. University of Wales, 2000. – 201 p.

[5] Milecki, A. Application of magnetorheological fluid in industrial shock absorbers / A. Milecki, M. Hauke // Mechanical Systems and Signal Processing. – Vol. 28, 2012, P. 528-541.

[6] Kordonsy, William. Magnetorheological valve and devices incorporating magnetorheological elements. US5452745A, United States Patent and Trademark Office, 25 september 1995

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF MAGNETORHEOLOGICAL VALVE THROUGH GEOMETRIC PARAMETER VARIATION OF TECHNOLOGICAL GAP

Shelkovyy M.A.
Bazinenkov A.M.
Shagimuratova A.K.

Bauman Moscow State University

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

shma18t387@student.bmstu.ru

The use of magnetorheological fluid as a working fluid is an effective solution in terms of vibration protection and accuracy of drive movement. The magnetorheological drive is capable of moving an object weighing up to 100 kg with a movement error of 50 nm. The main control element of the drive is the magnetorheological valve. The magnetic field created in the process gap is a key characteristic of the valve. The study of the magnetic field induction in the technological gap of the inductor using the finite element method made it possible to determine the best combination of geometric parameters of the magnetic field concentrators (teeth) in terms of the maximum magnetic induction in the gap, which amounted to 1.4 Tesla. Increasing the induction in the gap will improve the efficiency of fluid flow control by the throttle, as well as the accuracy and speed of the drive.

Keywords: magnetorheological fluid; hydraulic drive; magnetorheological valve; technological gap; finite element method

References

- [1] Magnitoreologicheskie zhidkosti: tekhnologii sozdaniia i primeneniie: monografiia [Magnetorheological fluids: technologies of creation and application: monograph] / E. S. Beliaev [and etc.]; edited by A. S. Plekhov. – Nizhegorod. gos. tekhn. un-t im. R.E. Alekseeva [Nizhny Novgorod State Technical University], 2017. 94 p. (in Russian).
- [2] Naygert, K. V. Prikladnye svoistva magnitoreologicheskikh zhidkoste: uchebnoe posobie [Applied properties of magnetorheological fluids: textbook] [Electronic resource] / K. V. Naygert, V. A. Celishchev // Ufimsk. gos. aviats. tekhn. un-t [Ufa State Aviation Technical University (USATU)]. – Ufa: UGATU Publ, 2021. – URL: https://ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-81.pdf. (in Russian).
- [3] Bondarenko, M. E. Kratkii obzor podkhodov k modelirovaniu magnitoreologicheskikh zhidkoste [Brief overview of approaches to modeling magnetorheological fluids] / M. E. Bondarenko, A. S. Fetisov, A. Iu. Babin, V. O. Tiurin // XXX Mezhdunarodnaia innovatsionnaia konferentsiia molodykh uchenykh i studentov (MIKMUS - 2018) : Sbornik trudov konferentsii [XXX International Conference of Young Scientists and Students : Collection of conference proceedings], Moscow, 20–23 November 2018. – Moscow: Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), 2019. pp. 236-239. EDN YWLDFR. (in Russian).
- [4] Barnes, H. A. A Handbook of Elementary Rheology / H. A. Barnes. – Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. University of Wales, 2000. – 201 p.
- [5] Milecki, A. Application of magnetorheological fluid in industrial shock absorbers / A. Milecki, M. Hauke // Mechanical Systems and Signal Processing. – Vol. 28, 2012, P. 528-541.
- [6] Kordonsy, William. Magnetorheological valve and devices incorporating magnetorheological elements. US5452745A, United States Patent and Trademark Office, 25 september 1995