

УДК 543.271; 533.5.08

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИЙ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ДРОССЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Павел Александрович Долинин, Олег Дмитриевич Якушев

Магистры 1 года

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.М. Базиненков,

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

Введение

Современный мир предъявляет всё более жёсткие требования к механизмам точных (прецизионных) перемещений, которые находят применение в множестве сфер: медицина (лазерная коррекция зрения), астрономия (адаптивные телескопы), электронное машиностроение (сканирующие зондовые микроскопы, установки фотолитографии), станкостроение и пр.

Существует множество устройств, приводов (механизмов перемещений), позволяющих осуществлять перемещения с высокой точностью: электромеханический (с шарико-винтовой передачей, с линейными актуаторами), гидравлический, пьезоэлектрический, магнитострикционный. Каждый механизм перемещений обладает рядом параметров, характеризующих его, таких как, нагрузочная способность, погрешность позиционирования и скорость перемещения, постоянная времени (характеристика быстродействия). Очевидно, что разные механизмы подходят для разных задач и выбираются исходя из индивидуального набора требований.

Достаточно перспективным механизмом перемещений является гидравлический механизм на основе магнитореологической жидкости (далее МР привод), который сочетает высокие нагрузочные и точностные характеристики.

В рамках научно-исследовательской работы, проводимой на кафедре МТ11 «Электронные технологии в машиностроении», возникла необходимость спроектировать управляемый напряжением универсальный магнитореологический (далее МР) дроссель, который регулирует расход через напорную магистраль трёхкоординатного гидравлического прецизионного МР привода.

1 Гидравлический МР привод

Магнитореологический привод (рис. 1) был разработан в 1990-х годах на кафедре МТ11 для задач юстировки элементарных зеркал адаптивных телескопов [1]. Рассмотрим конструкцию привода.

Данный привод гидравлического штокового типа параллельной кинематики совмещает в себе такие параметры, как высокая нагрузочная способность (до 100 кг) и быстродействие (постоянная времени до 200 мс). За перемещение по одной координате отвечает пара гидроцилиндров, устройство нижнего, являющегося опорой, ничем не отличается от остальных, крышка выполнена в виде фланца.

В каждый гидравлический цилиндр конструктивно встроены по паре МР дросселей (рис. 2), один регулирует подачу МР жидкости в гидроцилиндр, второй – за слив из нее. МР дроссели в каждой паре цилиндров подключены по гидравлической мостовой схеме.

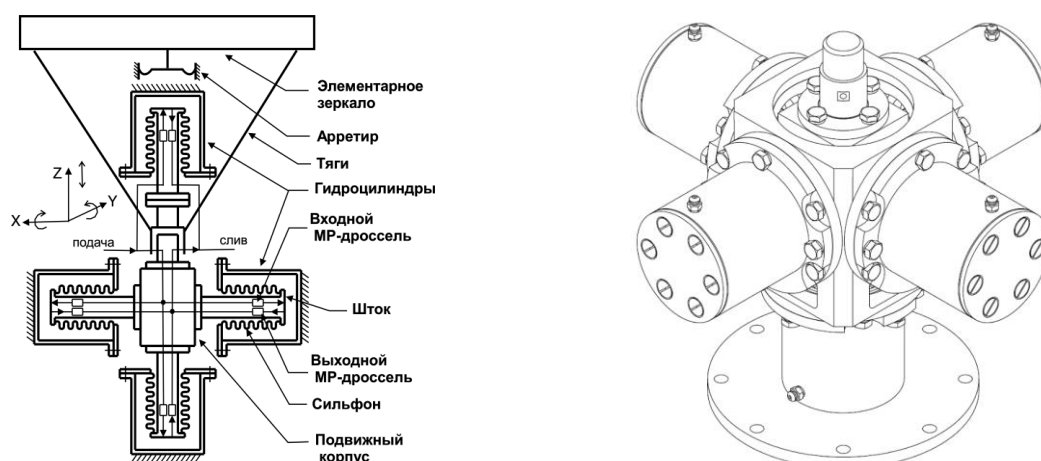
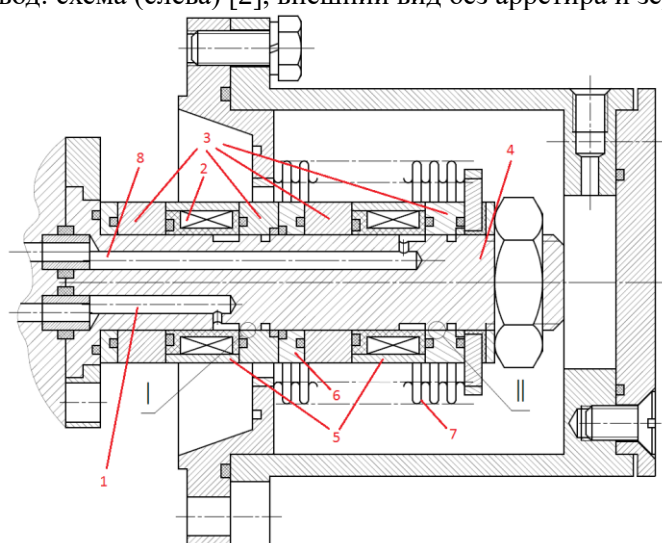


Рис. 1 – МР привод: схема (слева) [2], внешний вид без арретира и зеркала (справа)



1 – входной канал, 2 – катушка, 3 – магнитопровод, 4 – шток, 5 – магнитная втулка, 6 – магнитная изоляция, 7 – направляющая (гидроформованный сильфон), 8 – выходной канал
Рис. 2 – Гидроцилиндр в разрезе [3]

МР привод работает следующим образом. Жидкость через входной канал 1 (рис. 2) попадает из распределителя в гидроцилиндр, протекает в кольцевой канавке под катушкой 2, затем поступает в рабочий зазор (I – входной, II – выходной), размер которого в радиальном направлении составляет 200 мкм, где жидкость структурируется под действием магнитного поля. Магнитный поток, наводимый катушкой индуктивности, пронизывает шток 4, магнитопровод 3 и втулку 5, являющуюся замыкателем магнитного поля. В полости рабочего зазора в магнитопроводе нарезаны зубья, являющиеся концентраторами магнитного поля (рис. 3). Для магнитной изоляции между магнитопроводящими деталями присутствуют вставки типа 6 из алюминиевого сплава.

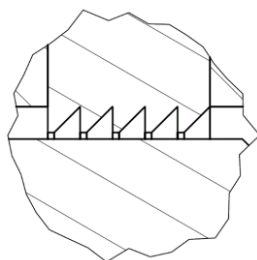


Рис. 3 – Увеличенное изображение рабочего зазора с концентраторами магнитного поля

После зазора имеется ещё одна кольцевая канавка, соединённая с каналом, по которому жидкость попадает в полость между корпусом гидроцилиндра и сильфона 7, выполняющего одновременно роль герметизирующего и направляющего элемента. Из полости под действием давления она попадает в выходной канал 8, пройдя перед этим аналогичное структурирование под действием выходного дросселя.

Для перемещения поршня (штока) МРЖ подаётся в цилиндры, при помощи подачи электрического тока на управляющие катушки МР дросселей регулируется ее поступление в цилиндры, и тем самым создается разность давлений в цилиндрах, которая заставляет шток совершать перемещение.

2 Обзор конструкций МР дросселей

Как видно из вышеприведённых рисунков, МР дроссель (прочие конструкции схожи) состоит из катушки индуктивности, магнитопровода, образующих магнитную систему устройства, канала, по которому протекает жидкость, структурирующаяся под действием магнитного поля вследствие МР эффекта. Таким образом, создаваемое напряжение на обмотке катушки преобразуется в ток, который индуцирует магнитное поле, и через магнитопровод происходит намагничивание рабочего зазора и структурирование жидкости, т.е. локальное изменение её вязкости, следовательно, и возможного перепада давлений на дросселе. С помощью метода морфологического ящика можно проанализировать варианты конструкций дросселей и предложить качественно новое решение, затем проанализировать его и сравнить с существующими.

Катушка индуктивности, создающая магнитное поле, может быть расположена по-разному по отношению к каналу протекания жидкости – снаружи для небольших каналов, внутри для каналов большого диаметра, что экономит место (пространственный ресурс) в конструкции.

Уплотнения обеспечивают герметизацию конструкции. Можно выполнить канавки в каждом элементе конструкции, а можно поставить уплотнения только между крышкой и корпусом, герметичность в обоих случаях будет обеспечена.

Канал в дросселе может быть как кольцевым, так и плоским, в некоторых случаях винтовым, соответственно, это влияет на форму дросселя и расположение остальных элементов конструкции, некоторые конструкции содержат канал произвольной формы.

Корпус дросселя можно выполнить из магнитного материала, а можно из немагнитного, в некоторых патентах [4, 5, 6] указано, что в первом случае повышается управляемость. Недостатком существующей конструкции является взаимное влияние управляющих катушек друг на друга, а также индивидуальность и, как следствие, узкий спектр потенциальных МР приводов, для которых дроссель может быть использован.

Некоторые конструкции дросселей имеют второй канал, который не управляется магнитным полем, либо слабо управляется, что позволяет обеспечить минимальный постоянный расход через дроссель даже при приложении запирающего напряжения. Также данный канал выполняется в устройствах с большими скоростями деформации сдвига, при которых теряется целесообразность использования магнитореологического эффекта из-за больших скоростей течения, и дополнительный канал позволяет снизить расход через управляемый канал, что в свою очередь уменьшает скорость протекания жидкости в нём. Иногда упомянутый канал выполняют с механическим дросселированием.

Через систему, рабочей жидкостью в которой является МР жидкость, может прокачиваться как сама МРЖ, так и лишь масло, либо другая рабочая жидкость, в этом случае частицы должны оставаться в пределах дросселя, с этой целью устанавливают сетчатые элементы (существуют иные технические решения) на входе/выходе для их удержания внутри объёма канала.

Составим таблицу на основе рассмотренных конструктивных признаков (табл. 1).

Таблица 1. Конструктивные признаки МР дросселя

Признак объекта	Варианты реализации признаков			
	1	2	3	4
А	Внутри	Снаружи	-	-
Б	Везде	Только корпус	-	-
В	Кольцевой	Плоский	Винтовой	Произвольный
Г	Магнитный	Немагнитный	-	-
Д	Присутствует	Отсутствует	-	-
Е	Присутствует	Отсутствует		

3 Отбор конструктивных решений МР дросселей

Максимальное общее количество решений при указанном разбиении конструктивных особенностей составляет $2 \times 2 \times 4 \times 2 \times 2 \times 2 = 128$. Был проведён патентный поиск и отобраны решения из «ящика».

3.1 МР дроссель с винтовым каналом (вариант №1)

Конструктивные признаки: А2-Б2-В3-Г2-Д1-Е2 (катушка снаружи канала, уплотнения только на корпусе, канал винтовой, корпус немагнитный, проточный канал присутствует, ловушка отсутствует). Данный вариант был реализован в патенте СССР №777313 [4]. Жидкость контролируется в спиральном канале, образованном корпусом 1 катушки 2 и винтовой поверхностью сердечника 3.

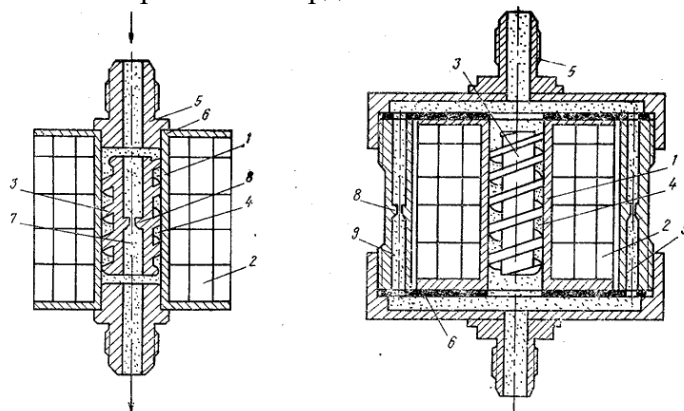


Рис. 4 – Магнитореологический дроссель с винтовым каналом и дополнительным проточным (слева), вариант исполнения проточного канала (справа) [4]

3.2 МР дроссель с магнитным корпусом (вариант №2)

Конструктивные признаки: А2-Б2-В2-Г1-Д2-Е2 (катушка снаружи канала, уплотнения только на корпусе, канал плоский (вертикальный), корпус магнитный, проточный канал отсутствует, ловушка отсутствует). Данный вариант реализован в патенте СССР №1024637 [5]. Жидкость меняет свои свойства в вертикальных каналах, образованных магнитопроводом 2 и шайбой 3.

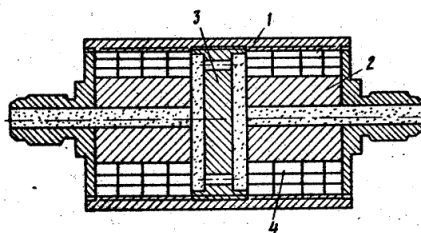


Рис. 5 – Магнитореологический дроссель с магнитным корпусом и двумя последовательно включёнными катушками индуктивности [5]

3.3 МР дроссель с сеточными загорадителями (вариант №3)

Конструктивные признаки: А2-В2-В2-Г1-Д2-Е1 (катушка снаружи канала, уплотнения только на корпусе, канал плоский (вертикальный), корпус магнитный, проточный канал отсутствует, ловушка присутствует). Вариант конструкции очень похож на предыдущий и реализован в патенте СССР №1366756 [6]. Жидкость меняет свои свойства в каналах, образованных магнитопроводом 3 и шайбой 5 с каналами 6 для свободного протекания жидкости. Ловушки показаны пунктиром (элементы 9).

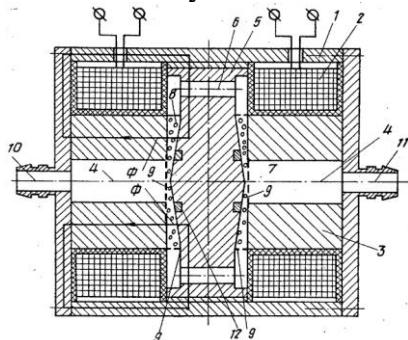


Рис. 6 – МР дроссель с магнитной шайбой и сеточными загорадителями [6]

3.4 МР дроссель с карманом и ловушкой (вариант №4)

Конструктивные признаки: А2-В2-В4-Г1-Д2-Е1 (катушка снаружи канала, уплотнения на корпусе, канал произвольной формы, корпус магнитный, проточный канал отсутствует, ловушка присутствует). Данный вариант реализован в патенте РФ №2343533 [7]. Магнитные частицы под действием поля собираются в карманах, что позволяет жидкости беспрепятственно течь сквозь центральный канал, частицы удерживаются сеточными элементами. Когда поле отсутствует, жидкость тормозится за счёт вязкого трения с ферромагнитными частицами.

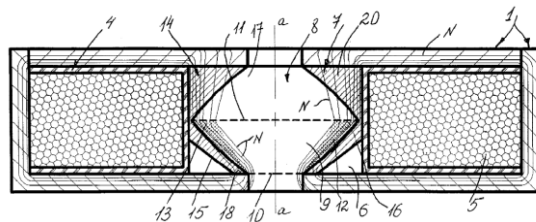


Рис. 7 – МР дроссель с карманом и ловушкой [7]

3.5 МР дроссель с мембраной (вариант №5)

Конструктивные признаки: А2-В2-В4-Г2-Д2-Е1 (катушка снаружи канала, уплотнения на корпусе, канал произвольной формы, корпус немагнитный, проточный канал отсутствует, ловушка присутствует). Данный вариант реализован в патенте РФ №2240590 [8]. Магнитные частицы под действием поля деформируют упругую мембрану 1 (является ловушкой для частиц), таким образом изменяя проходное сечение канала, что регулирует расход жидкости в дросселе.

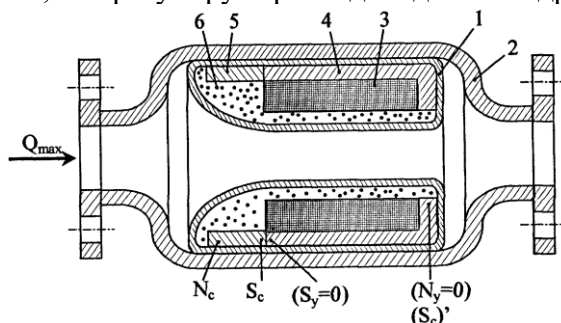


Рис. 8 – МР дроссель с мембраной [8]

3.6 Предлагаемая конструкция МР дросселя

Конструктивные признаки: А2-Б1-В1-Г2-Д2-Е2 (катушка снаружи канала, уплотнения на всех элементах, канал кольцевой формы, корпус немагнитный, проточный канал отсутствует, ловушка отсутствует). Данный вариант был рассмотрен в качестве основы для проектирования. Фрагмент сборочного чертежа дросселя представлен ниже на рис. 9. Жидкость меняет свою вязкость в рабочих зазорах (Б), образованных магнитопроводом 7, кольцевыми канавками, являющимися концентраторами магнитного поля, и сердечником 6. Радиально расположенные отверстия в опоре 5 служат для протекания жидкости через систему.

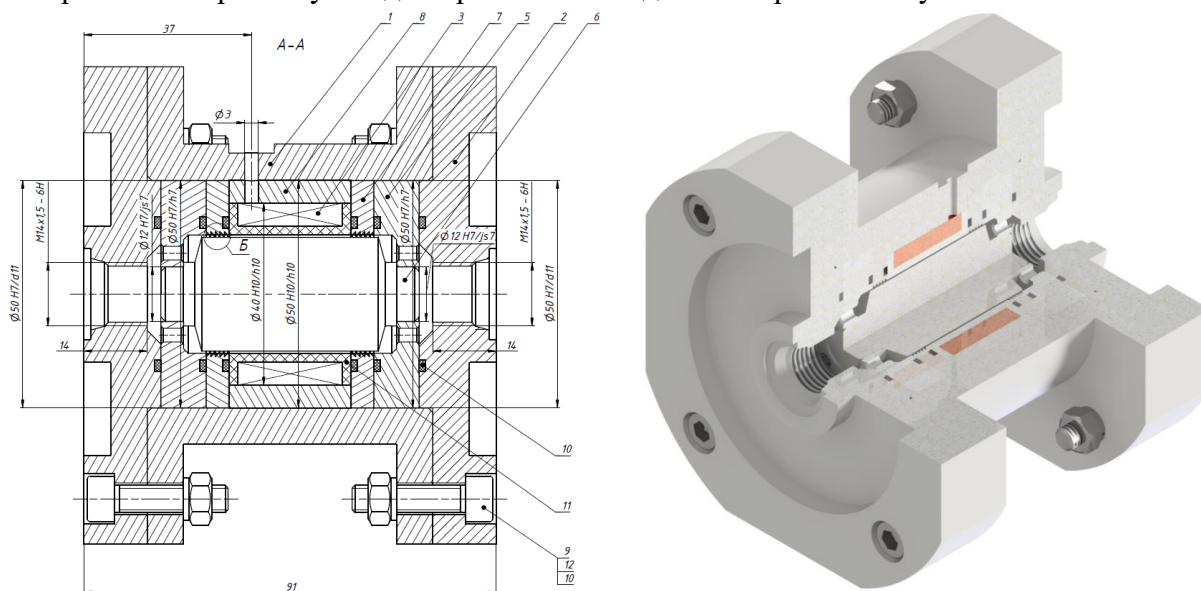


Рис. 9 – МР дроссель с зубцами

4 Расчет магнитного поля, создаваемого предлагаемым МР дросселем

В программный пакет для расчёта методом конечных элементов (далее МКЭ) была импортирована геометрия спроектированного дросселя, заданы свойства и области материалов, и с помощью магнитного интерфейса было получено распределение магнитной индукции внутри дросселя. Расчётное значение по зазору составило 0,2 Тл, в то время как конструкция, предложенная в варианте №3 и рассчитанная в том же пакете МКЭ, обеспечивает индукцию порядка 0,1 Тл, при этом присутствует взаимное влияние катушек через магнитопровод. Предложенная конструкция лишена указанного недостатка.

Параметры катушки были рассчитаны исходя из быстродействия дросселя (200 мс), т.к. с увеличением габарит катушки растёт наводимая в зазоре индукция, но вместе с тем растёт и время нарастания тока в неё. Конструкция дросселя способна выдержать перепад давления в 0,1 МПа, данный параметр можно увеличить.

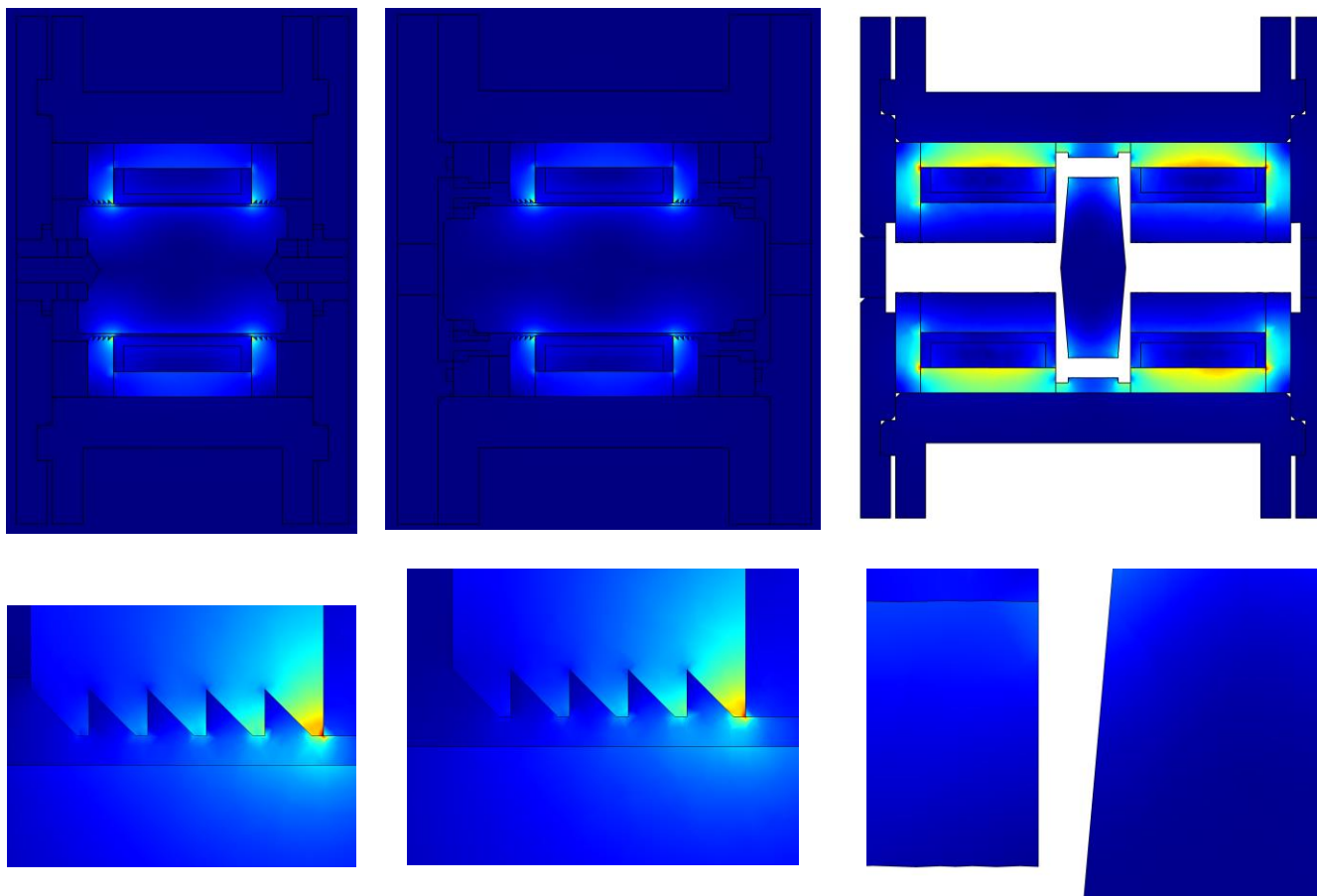


Рис. 10 – Расчёт различных конструкций МР дросселя (верхний ряд) и распределение магнитной индукции в рабочем зазоре (нижний ряд)

На рисунке ниже представлено распределение полной магнитной индукции (осевой и радиальной составляющих) на расчётной линии рабочего зазора. Как видно из графика и из рис. 10, наибольшей намагненностью обладает ближайший к катушке зубец, и распределение индукции можно описать линейной зависимостью.

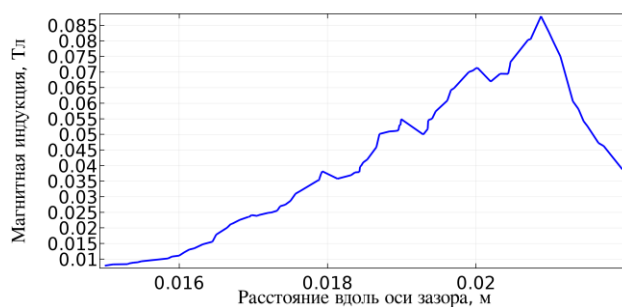


Рис. 11 – Распределение полной магнитной индукции вдоль рабочего зазора

5 Выводы

1. Проведенный анализ конструкций МР дросселей методом морфологического ящика позволил спроектировать универсальный МР дроссель, который показал при моделировании большую эффективность создания магнитного поля в рабочем зазоре, средняя магнитная индукция по рабочему зазору составила 0,2 Тл.
2. Предполагаемое быстродействие МР привода с указанным МР дросселем составит 200 мс.

Заключение

В работе рассмотрена конструкция существующего МР привода, выявлена необходимость спроектировать универсальный МР дроссель.

В рамках анализа конструкций МР дросселей проведён патентный поиск, выявлены основные особенности дросселей, на основе которого был составлен морфологический ящик, рассмотрены некоторые варианты конструкций.

На основе существующего МР дросселя был разработан универсальный дроссель для трёхкоординатного гидравлического МР привода. Разработанный дроссель отличается большей создаваемой индукцией магнитного поля в рабочем зазоре за счёт применения кольцевого зазора с канавками, удовлетворяет требованиям по магнитной индукции и быстродействию. Исследования МКЭ показали, что среднее расчётное значение индукции по длине зазора составляет 0,2 Тл.

Литература

1. Михайлов В.П., Степанов Г.В., Базиненков А.М. и др. Магнитореологические устройства активной виброизоляции и позиционирования для нанотехнологического оборудования // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана, серия "Приборостроение", специальный выпуск "Наноинженерия", - 2010, - С.138-148.
2. Михайлов В.П. Автоматизация управления процессами сверхточного позиционирования линейных модулей реологического типа : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06 / В.П. Михайлов. – М., 2003.
3. Дипломный проект РИК студента каф. МТ11 Дай Ван Чунга.
4. Магнитореологический дроссель: пат. 777313 СССР. № 2716951/25-08; заявл. 25.01.1979; опубл. 07.11.1980 Бюл. № 41. 3с.
5. Магнитореологический дроссель: пат. 1024637 СССР. № 3430686/25-08; заявл. 28.04.1982; опубл. 23.06.1983 Бюл. № 23. 2с.
6. Магнитореологический дроссель: пат. 1366756 СССР. № 4012314/31-08; заявл. 20.01.1986; опубл. 15.01.1988 Бюл. № 2. 2с.
7. Способ регулирования расхода жидкой среды и магнитореологическое устройство для его осуществления: пат. 2343533 РФ. № 2007113603/28; заявл. 12.04.2007; опубл. 10.01.2009 Бюл. № 1. 17с.
8. Способ регулирования расхода жидких и газообразных сред: пат. 2240590 РФ. № 2002108583/28; заявл. 04.04.2002; опубл. 20.11.2004.