

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

ДОЛГИХ АНТОНИНА ГЕННАДЬЕВНА

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
С ЛЕНТОЧНОЙ ОБМОТКОЙ ЯКОРЯ**

Специальность: 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук,
доцент Бориков Валерий Николаевич

Томск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение.....	5
ГЛАВА 1 Моментные двигатели с постоянными магнитами.....	14
1.1 Области применения моментных двигателей и предъявляемые к ним требования.....	14
1.2 Моментные двигатели с постоянными магнитами.....	16
1.3 Моментные двигатели с неограниченным углом поворота ротора.....	18
1.4 Варианты конструктивной реализации моментных двигателей....	20
1.5 Современное состояние вентильных моментных двигателей.....	21
1.6 Возможные пути совершенствования моментных двигателей.....	22
1.7 Проводящая лента как основа активного элемента.....	28
1.7.1 Взаимодействие проводника с током и магнитного поля.....	28
1.7.2 Возможные варианты реализации двигателей с пакетным элементом.....	31
1.7.3 Технологические аспекты изготовления ленточной намотки.....	33
Выводы к главе 1.....	36
ГЛАВА 2 Характеристики пластины как элемента ленточной намотки.....	37
2.1 Пластина как элемент ленточной намоткой.....	37
2.2 Сила взаимодействия магнитного поля и распределенного тока пластины.....	39
2.2.1 Характер распределения тока.....	39
2.2.2 Сила, действующая на источник магнитного поля.....	41
2.2.3 Прием построения зависимости "сила-перемещение". Вид зависимости.....	43
2.3 Формирование силовой характеристики дополнительными боковыми вырезами.....	47
2.4 Влияние размеров контактов на характеристику развиваемой	

силы.....	55
2.5 Сопротивление единичной пластины. Зависимость электрического сопротивления пластины распределенному току от ее длины.....	59
2.6 Температурные исследования пакета пластин.....	60
2.7 Магнитное поле пакета пластин.....	66
Выводы к главе 2.....	67
ГЛАВА 3 Характеристики моментного двигателя с ленточной намоткой.....	68
3.1 Момент двигателя с ленточной намоткой.....	68
3.2 Оценка влияния параметров намотки на величину момента.....	69
3.2.1 Выбор числа витков намотки.....	69
3.2.2 Зависимость момента от числа пар полюсов. Относительный момент.....	70
3.2.3 Определение относительной индукции варианта магнитной цепи моментного двигателя.....	71
3.2.4 Относительные сопротивление и двойной интеграл.....	75
3.2.5 Зависимость относительного момента от числа пар полюсов.....	82
3.3 Относительная мощность потребления.....	85
3.4 Относительная статическая добротность.....	88
3.5 Момент сопротивления от действия вихревых токов.....	93
3.6 Момент двигателя с учетом реакции тока ленточной намотки.....	96
3.7 Момент с учетом реакции тока ленточной намотки на примере вентильного двигателя.....	101
Выводы к главе 3.....	106
ГЛАВА 4 Экспериментальные исследования элементов и макетного образца моментного двигателя с ленточной намоткой.....	108
4.1 Тепловая стойкость ленточной намотки.....	108
4.2 Экспериментальная установка для исследования пакетного	

элемента. Результаты эксперимента.....	112
4.3 Экспериментальная установка для исследования моментного двигателя с ленточной намоткой. Результаты эксперимента.....	118
4.4 Экспериментальное исследование момента сопротивления от вихревых токов. Результаты эксперимента.....	121
4.5 Сопротивление пластины.....	124
Выводы к главе 4.....	125
Заключение.....	127
Список используемой литературы.....	128
Приложение А. Патенты на изобретение.....	141
Приложение Б. Акты внедрения результатов диссертационной работы.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В настоящее время во многих технических системах применяются моментные двигатели, предназначенные для непосредственного встраивания в механизм, от которого требуется обеспечение высокой точности и хороших динамических характеристик. Применение моментных двигателей вызвано тем, что они позволяют отказаться от редуктора, который является сложным, дорогостоящим элементом, снижающим надежность системы.

Электродвигатели прямого (безредукторного) привода называются «моментными». Внешне они отличаются от двигателей классического исполнения, так как не имеют корпуса, вала, подшипников и потребителю поставляются в виде двух узлов: ротора и статора. Слово «моментный» в обозначении такого двигателя имеет два смысловых понятия. Во-первых, это означает, что двигатель предназначен для создания момента при работе на низких, в пределе, нулевых скоростях поворота объекта управления (заторможенный режим работы двигателя); во-вторых, к моментным относят электродвигатели, оптимизированные по удельному развиваемому моменту. Считается, что наиболее перспективными являются моментные вентильные двигатели с постоянными магнитами, обладающие линейными механическими и регулировочными характеристиками, высоким быстродействием, надежностью, большим сроком службы, особенно в тяжелых и экстремальных условиях эксплуатации систем авиационной, космической и морской техники.

Фундаментальными в области разработки, проектирования и исследования моментных двигателей являются труды В. П. Бродовского, Л. И. Столова, Ю. А. Афанасьева, Ю. М. Беленького, Б. Н. Зыкова, Ш. С. Галева [5, 6, 69-71]. В работах профессора А. Г. Микерова [4, 7, 22, 23, 57-59, 87, 98], посвященных разработке и исследованию новых типов моментных двигателей, также перечислены ученые и инженеры, внесшие вклад в создание отечественных моментных двигателей и приводов на их основе: Ц. Л. Садовская, М. М. Минкин,

В. Н. Матвеева, Л. М. Епифанова, О. В. Епифанов, Б. Ф. Токарев, Е. В. Рубцова и др. Одним из ведущих отечественных разработчиков и производителей моментных двигателей с постоянными магнитами является ОАО «Машиноаппарат» [55]. В конце двадцатого века на мировом рынке появились бесконтактные моментные двигатели встраиваемого исполнения компаний Alxion, Axsys, ETEL, Kollmorgen, Moog, Parker, Transmotec и др., в которых реализованы идеи, изложенные в трудах D. Hanselman, J. R. Hendershot, T. J. E. Miller, T. Kenjo, S. Nagamori, A. Hughes, G.-D. Shtelting, F. J. Bartos [2, 47, 77, 90-92].

Проведенные исследования показывают, что отечественные моментные двигатели по ряду характеристик, в частности, по статической добротности, уступают аналогичным моментным двигателям. В связи с этим актуальной является задача совершенствования существующих отечественных двигателей, которую можно решить как использованием современных материалов, так и применением новых конструктивных и технологических методов, например, использованием высококоэрцитивных магнитных материалов, специальных обмоток, изменением магнитной системы ротора. Замена в электромеханическом преобразователе традиционной обмотки, выполненной обмоточным проводом, на обмотку из ленты, имеющей боковые вырезы, позволяет повысить удельные характеристики электромеханического преобразователя в связи с хорошим теплоотводом и получить желаемые функциональные зависимости «момент-угол поворота ротора». Таким образом, совершенствование электромеханических преобразователей путем использования специальной обмотки ленточного типа, позволяющей получить улучшенные характеристики моментного двигателя, является актуальной и своевременной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка, исследование и экспериментальная апробация электромеханического преобразователя с ленточной обмоткой якоря, обладающего улучшенными характеристиками.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Анализ современного состояния моментных двигателей с постоянными магнитами и перспектив их развития для определения типов конструкций моментных двигателей, обеспечивающих высокие удельные показатели.
2. Обоснование возможности применения в качестве беспазовой обмотки якоря ленточной обмотки (намотки) и разработка математических моделей моментного двигателя нового типа.
3. Выработка на основе результатов исследований математической модели электромеханического преобразователя с ленточной обмоткой якоря рекомендаций по выбору геометрических параметров ленточной обмотки, обеспечивающих улучшенные характеристики моментного двигателя.
4. Разработка, изготовление и апробация электромеханического преобразователя с ленточной обмоткой якоря для проверки адекватности предложенных математической модели и расчетных зависимостей.
5. Оценка технических характеристик разработанных двигателей и их сравнение с характеристиками серийно выпускаемых аналогов и выработка рекомендаций по проектированию нового типа моментных двигателей с улучшенными характеристиками.

Методы исследования. В теоретических исследованиях использованы положения общей теории электромеханических преобразователей и электромагнитного поля, теории электрических и магнитных цепей, систем автоматизированного проектирования. Численное моделирование характера протекания распределенного тока и магнитного поля в рабочем зазоре проводилось с применением программных продуктов COMSOL Multiphysics и Agros2D, а разработка конструкции моментного двигателя – с помощью программного продукта T-Flex CAD. Для подтверждения основных теоретических выводов и адекватности математической модели проведены экспериментальные исследования на разработанных и изготовленных макетных образцах моментного двигателя с ленточной обмоткой.

Научная новизна работы

1. Впервые предложено, теоретически обосновано и экспериментально подтверждено применение в электромеханическом преобразователе ленточной обмотки якоря, которая позволяет усилить теплоотвод, обеспечить большую токовую нагрузку и повысить развиваемый момент (патент № 2441310, патент № 2454776).
2. Разработана конечно-элементная модель электромеханического преобразователя с ленточной обмоткой якоря, позволяющая определить и исследовать зависимости момента от угла поворота ротора, с учетом действия тока ленточной обмотки (реакции якоря).
3. Установлено влияние геометрических параметров ленточной обмотки якоря электромеханического преобразователя (соотношение длины и ширины пластины) на развиваемый момент.

Практическая ценность работы

1. Разработаны теоретические основы электромеханического преобразователя с ленточной обмоткой якоря.
2. Предложен тип ленточной обмотки, как вариант активного элемента электромеханического преобразователя, позволяющий применить новые конструкторско-технологические решения при разработке и производстве якорей моментных двигателей, в частности аддитивные технологии.
3. Разработан электромеханический преобразователь с ленточной обмоткой якоря для технических систем авиационного и космического назначения.
4. Предложены разработанные автором варианты однофазного моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора и двухфазного вентильного двигателя с неограниченным угловым рабочим диапазоном и минимальными пульсациями момента при повороте ротора.
5. Созданы экспериментальные установки, позволяющие проводить исследования моментных двигателей с ленточной обмоткой якоря и используемые для подтверждения адекватности и оценки результатов теоретических исследований.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований по теме диссертации использованы при выполнении следующих НИР:

- Программа «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК»), договор № 14 – 4 / 2013 на выполнение НИОКР по теме № 4 «Разработка и исследование моментного двигателя на основе ленточного активного элемента для исполнительных устройств систем бортовой автоматике летательных аппаратов». Проект № 17195.
- Грант РФФИ № 14-08-31068 мол_а «Разработка ленточного моментного двигателя и исследование его электрических и магнитных характеристик» на 2014-2015 гг.
- ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме «Разработка методов высокоуровневого проектирования многокомпонентных микросистем». Шифр заявки «2012-1.5-14-000-2016-006». Соглашение о предоставлении субсидии от 14 ноября 2012 г. № 14.В37.21.1951.

Результаты работы используются в АО «НПЦ «Полюс», г. Томск . Акт внедрения приложен к диссертационной работе.

Положения, выносимые на защиту

1. Электромеханический преобразователь с обмоткой якоря ленточного типа, обеспечивающий повышение момента по сравнению с существующими аналогами.
2. Конечно-элементная модель электромеханического преобразователя с ленточной обмоткой якоря, позволяющая определить зависимость «момент-угол поворота ротора».
3. Рекомендации по выбору конструктивных параметров ленточной обмотки, обеспечивающих максимальный развиваемый момент электромеханического преобразователя.
4. Результаты экспериментальных исследований электромеханического преобразователя с ленточной обмоткой якоря.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность полученных результатов определяется корректным использованием научно обоснованных методов исследований, сходимостью экспериментальных и расчетных данных. Результаты, полученные при проведении экспериментальных исследований, подтверждают справедливость научных положений и применимость выбранных методов, технических решений и выводов.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ-2009), г. Томск, Россия, 4-8 мая 2009 г.; XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ-2015), г. Томск, Россия, 5-9 октября 2015 г.; IV Всероссийский молодежный Форум с международным участием «Инженерия для освоения космоса», г. Томск, Россия, 12-14 апреля 2016 г.; V Международный молодежный Форум «Инженерия для освоения космоса», г. Томск, Россия, 18-20 апреля 2017 г.; 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Russia, Krasnoyarsk, September 12-13, 2013.; V Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2011), г. Новосибирск, Россия, 2-3 декабря 2011 г.; II Всероссийская научно-практическая конференция «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», г. Томск, Россия, 28 мая – 1 июня 2012 г.; Вторая научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева, посвященная 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем», г. Железногорск, Россия, март, 2011 г.; Научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», АО «НПЦ «Полус», г. Томск, Россия, 14-15 февраля 2013 г.; «Elektrotechnika a informatika 2013», Czech Republic, Nečtiny, November 2013; Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «КОСМОС-2012» в

рамках Международного научно-технического форума, посвященного 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва, г. Самара, Россия, 5-7 сентября 2012 г.

Личный вклад состоит в непосредственном участии на всех этапах процесса исследований; лично и полностью проведены численные исследования с помощью программных продуктов COMSOL Multiphysics, Agros2D и T-Flex CAD. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат: результаты экспериментальных и аналитических температурных исследований пакетного элемента моментного двигателя [1, 11]; моделирование характера протекания распределенного тока через ленточную намотку [2, 3, 4]; создание пакетного элемента методом сгиба ленты в «гармошку» [3]; оценка силы, создаваемой пакетным элементом с током и магнитным полем, при изменении ширины контакта [5, 6]; метод построения зависимости «момент-угол поворота ротора» с учетом реакции якоря моментного двигателя [7, 8, 12]; схема технической реализации моментного двигателя с ленточной намоткой [9, 10]; результаты исследования магнитной цепи двигателя [13].

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 13 публикациях, включая восемь статей в ведущих научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК, из них три статьи в зарубежном журнале, включенном в БД Scopus; две статьи в сборниках трудов международных конференций; два патента РФ на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 102 наименований и приложений. Работа содержит 149 страниц основного текста, включая 95 рисунков и 14 таблиц.

Логически работа построена как оценка текущего состояния проблемы – анализ нового типа обмотки – синтез электродвигателя.

В первой главе проведен анализ современного состояния моментных двигателей в России и за рубежом, рассмотрены различные варианты моментных

двигателей с постоянными магнитами и предъявляемые к ним требования, приведены пути возможного повышения удельных характеристик моментных двигателей, предложено конструктивное исполнение активного элемента моментного двигателя в виде ленточной обмотки (намотки), рассмотрен вариант подхода к технологии изготовления ленточной намотки с использованием аддитивных технологий.

Во второй главе аналитически выведено выражение для развиваемой пластиной с током и магнитным полем силы, с учетом того, что через пластину протекает распределенный ток; предложена методика построения силовой характеристики пластины ленточной намотки двигателя; показана возможность формирования необходимой функциональной зависимости силовой характеристики пластины ленточной намотки двигателя путем выполнения дополнительных боковых вырезов в пластине; показано, что при определенном соотношении размеров пластины ленточной намотки моментного двигателя будет наблюдаться минимальное значение ее сопротивления; показана возможность реализации предложенного варианта активного элемента на основе результатов численных исследований температурных полей пластины.

В третьей главе получено выражение для момента двигателя с ленточной намоткой и показано влияние составляющих, входящих в данное выражение, на момент; получены выражения для относительного момента, относительной потребляемой мощности и относительной статической добротности для определения характеристик двигателя при различном числе пар полюсов; разработана конечно-элементная модель моментного двигателя с ленточной намоткой с возможностью изменения числа пар полюсов и величины воздушного зазора, позволяющая определить тенденции изменения составляющих выражения для относительного момента; рассчитаны значения развиваемого двигателем момента, потребляемой мощности и статической добротности при одной паре полюсов для двух типоразмеров двигателя с ленточной намоткой, позволяющие получить значения данных характеристик при других величинах числа пар полюсов; проведено сравнение полученных расчетных результатов для двух

вариантов моментного двигателя с ленточной намоткой с характеристиками серийных бесконтактных моментных двигателей с гладким статором серии ДБМ; показано, что пусковой момент предлагаемого двигателя превосходит аналоги более чем в 2,5 раза; численными методами получена характеристика, связывающая тормозной момент, вызванный действием вихревых токов в намотке моментного двигателя от частоты вращения магнитопровода; разработан метод определения зависимости момента от угла поворота ротора с учетом действия распределенного тока ленточной намотки (реакции якоря); предложена схема двухфазного вентильного двигателя с ленточной намоткой и показана зависимость пульсаций развиваемого им момента к углу поворота ротора от величины протекающего по намотке тока.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования теплостойкости пластины ленточной намотки; разработаны и изготовлены экспериментальные установки для исследования характеристик моментного двигателя с пакетным элементом и моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора; выполнены экспериментальные исследования характеристик двигателей; проведены сравнения с результатами аналитических исследований; экспериментально определен диапазон коэффициента момента сопротивления, вызванного действием вихревых токов; экспериментально подтверждены результаты численного исследования сопротивления пластины, а именно, наличие минимума сопротивления при определенном отношении длины пластины (полусного деления) и ее ширины.

ГЛАВА 1

МОМЕНТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Повышенные требования к регулируемым электроприводам, которые поставлены перед российской промышленностью на ближайшее время, определяют, помимо совершенствования уже выпускаемой продукции, создание новой с более высокими качественными показателями. В частности, моментные двигатели являются достаточно распространенными в системах автоматизации.

Моментным двигателем традиционно назывался электромеханический преобразователь, у которого на вход подается электрический сигнал постоянного или переменного тока, а выходом является электромагнитный момент; при этом в рабочем режиме ротор двигателя либо неподвижен, либо вращается, но с малой частотой [70]. В настоящее время в термин "моментный двигатель" вкладываются два понятия. С одной стороны, это означает, что электродвигатель предназначен для создания момента при работе на сверхнизких скоростях поворота нагрузки; с другой, полагается, что двигатель оптимизирован по удельному развиваемому моменту на единицу массы, объема или потребляемой из сети мощности [58].

1.1. Области применения моментных двигателей и предъявляемые к ним требования

В качестве перспективных областей применения моментных приводов необходимо обратить внимание на следующие [4, 6, 22, 23, 45, 47, 58, 79, 89-92]:

- быстродействующие системы угловой стабилизации высокой точности с динамической ошибкой не более 1 угловой минуты;
- системы с повышенными показателями надежности и срока службы (с наработкой на отказ более $50 \cdot 10^3$ час), в том числе работающие в особо тяжелых условиях эксплуатации;
- исполнительные системы роботов и манипуляторов;

- регулируемый привод в медицинском приборостроении (аппараты "искусственная почка", принудительного кровообращения);
- приводы мотор-колес электрифицированных транспортных средств;
- системы создания регулируемой нагрузки в спортивных тренажерах;
- товары бытового назначения (стиральные машины, кухонные комбайны и др.).

Отдельно необходимо рассматривать вопрос о применении моментных приводов в специальной технике (оборона, космос), где требования к точности и надежности стоят на первом месте [46, 55].

Отмечается, что особое внимание к моментным двигателям было обращено, когда наличие в составе привода механического редуктора стало существенным ограничением точностных и эксплуатационных характеристик. В настоящее время электропривод, в котором механический редуктор исключен, принято называть "прямым приводом" [4-6, 45, 57, 58, 87, 90-92, 98].

Исходя из перспективных областей применения моментных двигателей, выделим основные требования, предъявляемые к ним:

1. Габариты и масса моментного двигателя должны быть возможно меньшими. Однако в ряде случаев моментные двигатели не имеют собственных вала и подшипников, являясь тем самым встраиваемой в систему конструкцией; а некоторые его размеры определяются общей компоновкой системы [9, 69, 76].
2. Мощность, потребляемая моментным двигателем должна быть минимальной. Данное требование с нагревом моментного двигателя, и, следовательно, со стабильностью характеристик машины.
3. Стабильность момента в пределах рабочего диапазона углов поворота ротора и его линейная зависимость от сигнала управления.
4. Пороговая чувствительность системы, содержащей моментный двигатель, должна быть достаточно высокой [69].
5. Электромеханическая и электромагнитная постоянные времени моментного двигателя должны быть возможно меньшими. Эти параметры обеспечивают

быстродействие системы с моментным двигателем и исключают ее неустойчивость.

Моментные двигатели можно классифицировать по назначению, принципу действия, роду тока и конструктивному исполнению. По способу создания основного магнитного потока моментные двигатели выполняются с возбуждением от постоянных магнитов и электромагнитного возбуждения. Также моментные двигатели различаются расположением якорной обмотки: на роторе или на статоре; количеством пар полюсов; способом подачи тока в обмотку управления (коллекторные, вентильные или с гибкими токоподводами); рабочим диапазоном углов поворота ротора и многими другими признаками. Подробное описание классификации моментных двигателей приведено в [69, 70].

1.2 Моментные двигатели с постоянными магнитами

В зависимости от принципа действия моментные двигатели постоянного тока выполняются как моментные двигатели с постоянными магнитами, как электромагнитные моментные двигатели, как электродинамические моментные двигатели и как поляризованные моментные двигатели [70].

Среди моментных двигателей постоянного тока наибольшее распространение получили моментные двигатели с постоянными магнитами, которые также называют магнитоэлектрическими. Моментные двигатели с постоянными магнитами характеризуются малым потреблением мощности на единицу момента, поскольку основной магнитный поток двигателя обеспечивается с помощью постоянных магнитов. Зависимость электромагнитного момента моментного двигателя с постоянными магнитами от сигнала в обмотке управления близка к линейной. Магнитоэлектрический двигатель работает на постоянном токе. Величина и знак момента зависят от величины и полярности тока управления, протекающего в обмотке рамки двигателя.

Моментные двигатели с постоянными магнитами представляют собой магнитоэлектрическую систему (рисунок 1.1), состоящую из постоянного магнита

с магнитопроводом и катушки, расположенной в магнитном поле воздушного зазора системы [62].

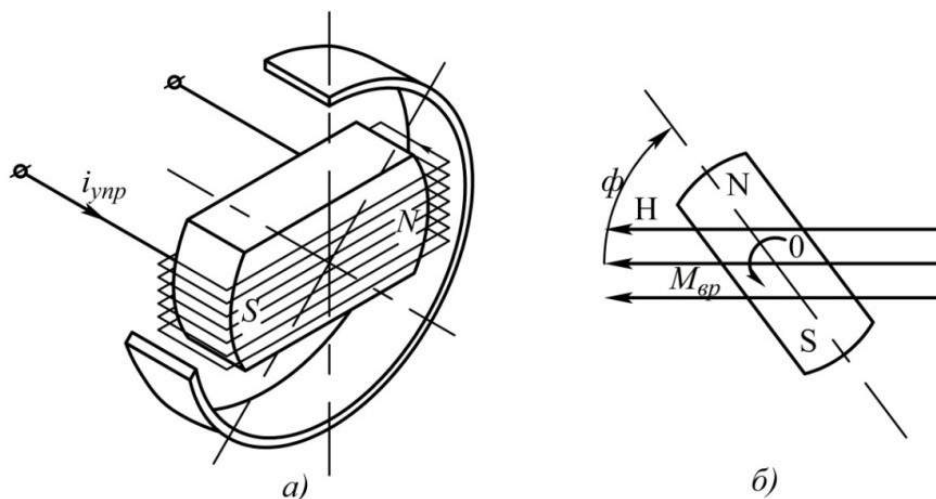


Рисунок 1.1 – Моментный двигатель с постоянными магнитами:
 а – схема магнитоэлектрического моментного двигателя;
 б – взаимодействие постоянного магнита с внешним полем

Сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле определяется выражением $F_{эм} = B \cdot l_p \cdot I$ и направлена перпендикулярно плоскости, образованной проводником и направлением магнитного поля. В данном случае B – индукция магнитного поля в воздушном зазоре; l_p – рабочая длина проводника; I – сила тока. Так как катушка двигателя имеет W витков, то суммарная электромагнитная сила, действующая на все витки катушки, расположенные в воздушном зазоре под одним полюсом будет равна $F_W = B \cdot l_p \cdot W \cdot I$. Для рассматриваемой схемы моментного двигателя на витки катушки, расположенные в воздушном зазоре под противоположными полюсами магнита, действует та же суммарная электромагнитная сила $F_{эм} = B \cdot l_p \cdot W \cdot I$, но она направлена в противоположном направлении. Эта пара сил создает относительно оси рамки момент $M = 2B \cdot l_p \cdot W \cdot I \cdot R_{cp}$, где R_{cp} – радиус, от оси вращения рамки до середины намотки катушки. Индукция в воздушном зазоре двигателя распределена по закону, близкому к косинусоидальному: $B = B_0 \cos\beta$, где B_0 – индукция в воздушном зазоре под центральной частью магнита. В

качестве постоянных магнитов в магнитоэлектрических моментных двигателях применяются высококоэрцитивные редкоземельные магниты [13, 24].

Конструктивное оформление магнитоэлектрических моментных двигателей бывает двух типов: с подвижной обмоткой и с магнитами на роторе. В первом случае основной магнитный поток создается неподвижной магнитной системой [71]. Такие моментные двигатели обладают малой мощностью управления и высокой чувствительностью. Во втором случае индуктор моментного двигателя расположен на роторе, что приводит к отсутствию необходимости токоподвода к вращающейся части машины.

В [70] приведен вариант классификации магнитоэлектрических моментных двигателей по рабочему диапазону углов поворота ротора, а также рассмотрены основные конструкции таких двигателей с ограниченным и неограниченным углом поворота ротора. Следует отметить, что по функциональным возможностям моментные двигатели с неограниченным углом поворота ротора находят более широкое применение [1, 2, 4, 6, 46, 79, 90, 91].

1.3 Моментные двигатели с неограниченным углом поворота ротора

Рассмотрим вентильные моментные двигатели с неограниченным углом поворота ротора и с непрерывной или дискретной коммутацией секций обмотки управления. Вентильный моментный двигатель с неограниченным углом поворота ротора представляет собой сочетание синхронной электрической машины, датчика положения ротора и схемы управления токами электрической машины. Синхронная электрическая машина имеет ротор-индуктор с постоянными магнитами либо с обмоткой возбуждения, питаемой постоянным током через контактные кольца или от вращающегося выпрямителя. Статор имеет двух- или трехфазную обмотку, питаемую от усилителей мощности схемы управления. В качестве датчика положения используются синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы, сельсины и другие информационные микромашины, у которых переменные выходные напряжения имеют огибающие, изменяющиеся по синусоидальному закону в функции от угла поворота ротора со

сдвигом по фазе, соответствующим пространственному сдвигу фаз синхронной электрической машины. Находят применение емкостные датчики с переменным выходным напряжением и с цифровым выходом, датчики с дросселями насыщения и датчики Холла [3, 5, 15, 70].

Схема управления имеет фазочувствительные выпрямители с фильтрами низкой частоты и усилители мощности, в некоторых случаях охваченные отрицательной обратной связью по току. Схема управления может содержать функциональные преобразователи для электрической компенсации конструктивного несовершенства электрической машины.

На рисунке 1.2,а [70] изображена магнитная цепь шестиполюсного моментного двигателя с постоянными магнитами. Ротор 1 содержит шесть постоянных магнитов 2, размещенных на магнитно-мягком корпусе; статор 3 может иметь зубцово-пазовую зону и кольцевую или барабанную обмотку управления. Постоянные магниты не имеют полюсных наконечников, поэтому индукция в зоне полюсов, а следовательно, и момент относительно велики. Наличие большого числа полюсов позволяет несколько снизить размеры и массу двигателя. В обращенном варианте конструкция используется и в коллекторном моментном двигателе.

На рисунке 1.2,б показана конструкция многополюсного торцевого моментного двигателя с постоянными магнитами. На роторе 1 расположены постоянные магниты 2 с полярностью, чередующейся по длине окружности ротора. Правая и левая половины 3 и 4 шихтованного статора содержат синусные обмотки 5 и 6, расположенные в радиальных пазах.

На рисунке 1.2,в показан многополюсный моментный двигатель с постоянными магнитами, у которого в целях сокращения осевой длины используется кольцевая обмотка управления. Обмотка размещается на зубчатом статоре 3. Индуктор выполнен с помощью радиально намагниченных постоянных магнитов, имеет полюсные наконечники и располагается на роторе. [70].

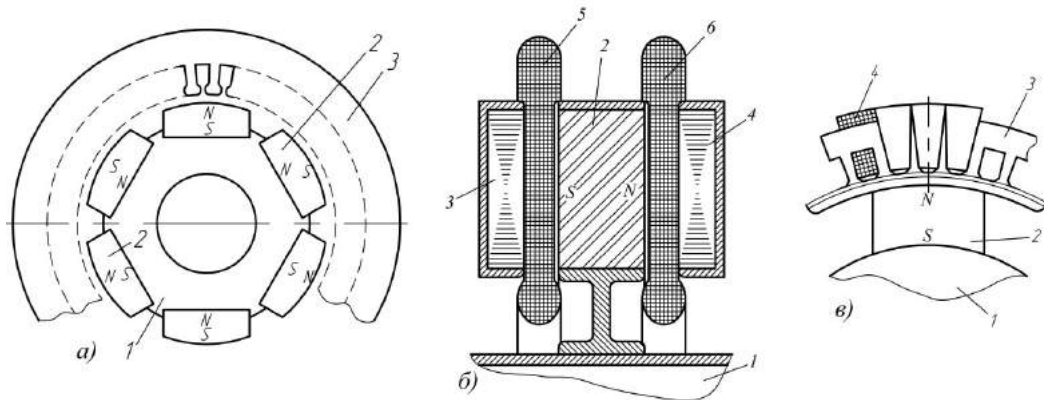


Рисунок 1.2 – Многополюсные моментные двигатели с постоянными магнитами: а – шестиполюсный; б – многополюсный торцевой; в – многополюсный с кольцевой обмоткой управления

1.4 Варианты конструктивной реализации моментных двигателей

Следует отметить, что моментные двигатели прямых приводов существенно отличаются от классических электродвигателей, так как не имеют корпуса, вала и подшипников, и поставляются в виде двух узлов: ротора и статора, имеющих форму плоских колец, которые монтируются в элементы привода (рисунок 1.3) [58].

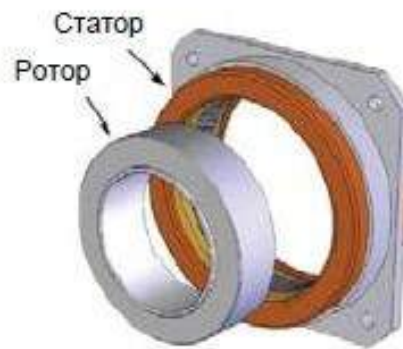


Рисунок 1.3 – Традиционная конструкция моментных двигателей

Указанное обстоятельство дает разработчику привода неплохие возможности для создания оптимальной, приспособленной для конкретных условий, конструкции (рисунок 1.4).

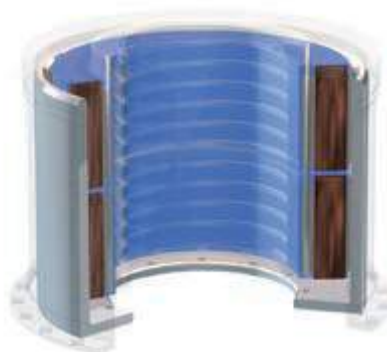


Рисунок 1.4 – Объединение двух моментных двигателей с целью увеличения момента

Бесконтактные моментные двигатели с постоянными магнитами на роторе находят широкое применение в оборонной технике, промышленности, быту, вследствие их достаточно неплохих эксплуатационных характеристик [1, 2, 4-6, 79, 90, 91].

1.5 Современное состояние вентильных моментных двигателей

В нашей стране разработка и проектирование вентильных двигателей малой мощности встраиваемого исполнения для специальных задач началось в семидесятых годах прошлого столетия во ВНИИИЭМ, ЦНИИКП, ЦНИИАГ, ЦНИИ Электроприбор, НИЭМ (г. Миасс) и ряде других организаций [14, 44, 45]. История и этапы создания отечественных моментных двигателей достаточно подробно изложены в работах профессора А. Г. Микерова [3-7, 22, 23, 57, 58, 87, 98]. В этих работах упоминаются ученые и инженеры, внесшие свой вклад в разработку и производство моментных двигателей: В. Н. Бродовский, Ц. Л. Садовская, М. М. Минкин, Ю. М. Матвеева, Л. М. Епифанова, О. В. Епифанов, Е. В. Рубцова и др. Широко известны в инженерной практике труды Л. И. Столова, А. Ю. Афанасьева, Б. Н. Зыкова, Ш. С. Галеева, А. В. Демагина и многих других [19, 69-71]. Технические решения и разработки, сделанные в тот период времени, легли в основу современных концепций построения моментных двигателей. Так, завод ОАО «Машиноаппарат» до настоящего времени производит серию электродвигателей ДБМ, пополнившуюся новыми рядами 2ДБМ и 3ДБМ [55].

В конце восьмидесятых годов прошлого века на мировом рынке появились бесконтактные моментные двигатели известных компаний Alxion, Axsys, ETEL, Inland (Kollmorgen), Moog, Parker, Ruchservomotors, Transmotec и др. [93, 99] в которых реализованы идеи, изложенные в трудах D. Hanselman, J. R. Hendershot, T. J. E. Miller, T. Kenjo, S. Nagamori, A. Hughes, G.-D. Shtelting, F. J. Bartos [3, 47, 77, 90-92].

В настоящее время разработка современных вентильных электроприводов является вновь перспективным направлением. В частности, на базе электродвигателей серий ДВФ и ДВМ Чебоксарским электроаппаратным заводом (ОАО "ЧЭАЗ"), разработана новая серия вентильных двигателей 5ДВМ. Проектированием и изготовлением вентильных электродвигателей занимаются: Конструкторское бюро мехатроники, г. Златоуст Челябинской области; ОАО "КБ ПА", г. Ковров Владимирской области; Лаборатория специальных машин (ЛСМ) ЗАО "СЗЭМО", г. Санкт-Петербург; ОАО ППТФ «ЭЛМА-Ко», г. Санкт-Петербург и др. [44]. Необходимо отметить, что ведущими отечественными организациями по разработке и выпуску новых типов моментных двигателей являются ЦНИИ Электроприбор и московский завод ОАО «Машиноаппарат». Последний позиционирует себя как основной разработчик моментных двигателей для авиации и космоса [46, 55].

Ведущие организации как в России, так и за рубежом, проводят разработку и производство все более новых и совершенных моментных двигателей.

Однако анализ показывает, что технические характеристики продукции зарубежных фирм превосходят аналогичные моментные двигатели отечественного производства [22, 23]. Данное обстоятельство является решающим в обосновании актуальности проведения работ по улучшению ситуации с совершенствованием моментных двигателей.

1.6 Возможные пути совершенствования моментных двигателей

В первую очередь, при постановке задачи совершенствования какого-либо изделия, необходимо провести соответствующий анализ, выбрать оптимальные

пути достижения желаемого совершенства. Применительно к моментному двигателю можно указать следующие направления и пути исследования и совершенствования:

- применение новых магнитных материалов;
- изменение конструкции ротора;
- использование новых типов обмоток.

В электрических машинах новых серий применяются термостабильные постоянные магниты Ne-Fe-B со специальными легирующими добавками, позволяющие повысить коэрцитивную силу и сохранить магнитные свойства при значительном нагреве. Данные аспекты способствуют улучшению удельных показателей машины и уменьшению себестоимости магнитных материалов. Однако указывается, что все отечественные марки магнитов неодим-железо-бор пока не обеспечивают уровни долговечности, стойкости к спецфакторам и температурной стабильности, необходимые для многих объектов специальной техники [24]. В России исследования поведения магнитных материалов и их влияние на характеристики моментных двигателей проводятся в ОАО НПО «Магнетон» совместно с ОАО «Машиноаппарат» [24, 55]. Несмотря на имеющиеся достижения, скорее всего, в ближайшее время существенного рывка в создании более "мощных" магнитов не предвидится.

В частности, при проектировании двигателей новой серии ДБМВ ставилась задача повышения энергетических и динамических показателей за счет увеличения коэффициента статической добротности по моменту и снижения электромеханической постоянной времени при возможном упрощении технологического процесса и снижения себестоимости. Одним из конструктивных мероприятий была замена ротора с тангенциально намагниченными магнитами на ротор типа "звездочка" с магнитами, намагниченными радиально. Такой подход позволил существенно увеличить внутренний диаметр ротора, уменьшить массу магнитов и снизить момент инерции ротора [57].

Несколько подробнее необходимо остановиться на рассмотрении обмоток моментных двигателей. Для подавляющего большинства бесконтактных

моментных двигателей с постоянными магнитами обмотка якоря расположена на статоре. В рабочем режиме двигателя, когда его ротор практически неподвижен, энергия, подводимая к нему из сети, почти полностью выделяется в виде тепла в обмотках двигателя. Этот режим соответствует пусковому режиму (или короткого замыкания) обычных вращающихся электродвигателей. Из чего можно сделать вывод, что моментные двигатели нуждаются в более надежной системе охлаждения и поэтому проигрывают в массогабаритных показателях по сравнению с обычными вращающимися электродвигателями с таким же моментом.

Статор моментного двигателя может иметь два конструктивных исполнения: пазовый (slotted) и гладкий (slotless) (рисунок 1.5) [90]. В первом случае обмотка расположена как у большинства электрических машин в пазах сердечника. Гладкий статор имеет обмотку, размещаемую на немагнитном основании, либо обмоточная структура создается путем компаундирования обмотки, предварительно выполненной на шаблоне.

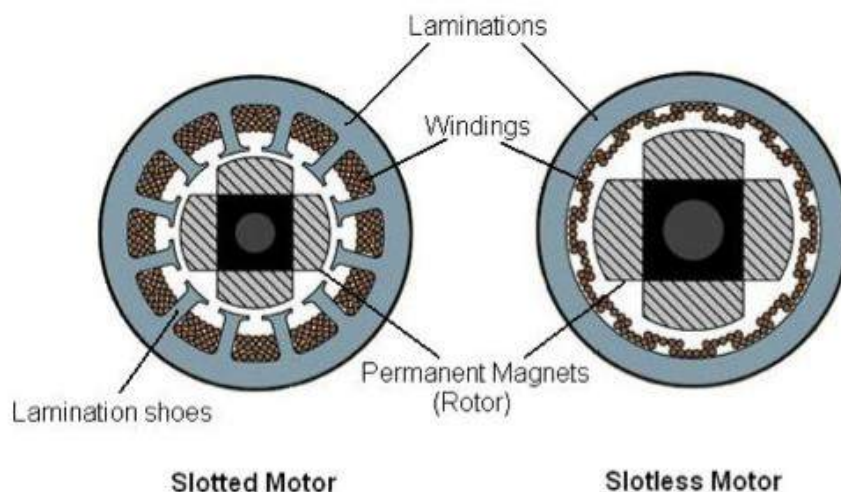


Рисунок 1.5 – Виды обмоток статора моментного двигателя

Электродвигатели с гладким статором создают меньший вращающий момент, чем с пазовым статором, однако пульсации вращающего момента по углу поворота ротора у них существенно меньше. Кроме того, нелинейность зависимости максимального статического синхронизирующего момента от потребляемого тока у двигателей с гладким статором также меньше, чем соответствующая характеристика у двигателя с пазовым статором. У двигателя с

гладким статором отсутствует реактивный остаточный момент [100, 101]. Указанные обстоятельства приводят к тому, что двигатели с гладким статором широко применяются в прецизионных приборных системах [43]. На выпуске таких моментных электродвигателей серии ДБМ по ОСТ В 160.515.07685 специализируется завод ОАО «Машиноаппарат» (рисунок 1.6) [55].



Рисунок 1.6 – Беспазовые моментные двигатели серии ДБМ

Типы якорных обмоток, применяемых в моментных двигателях, те же самые, что и в традиционных электродвигателях. Обмотки могут быть кольцевыми, барабанными, сосредоточенными, распределенными, ромбовидными (диагональными) и др. Анализ существующих обмоток и их влияние на характеристики электродвигателей проведен в ряде научных источников [43, 82, 88, 102]. Достаточно полно и подробно эти вопросы рассматриваются, в частности, в работах [8, 64, 75].

Имеющиеся наработки в конструировании моментных приводов, систем управления ими, применении новых материалов – в некоторой степени позволят улучшить качественные показатели новых разрабатываемых систем. Однако не исключается вероятность того, что традиционные решения к разработке моментных двигателей могут приблизиться к своему пределу, когда их характеристики практически нельзя будет существенно улучшить. В этом случае появится необходимость новых конструктивных подходов.

Моментные электродвигатели могут оцениваться различными характеристиками [19], но преимущественно на практике используется коэффициент статической добротности (статическая добротность). Этот

коэффициент учитывает развиваемый двигателем пусковой момент M , массу двигателя (массу активных частей) m и потребляемую двигателем при пуске мощность P

$$Q = \frac{M}{m \cdot \sqrt{P}}.$$

Указывается, что для современных моментных электродвигателей величина статической добротности лежит в пределах 0,2-0,3 Н·м/кг·Вт^{0,5} [23, 58]. Некоторые из отечественных моментных двигателей в этот диапазон не попадают, у них статическая добротность ниже. В частности, в работе [63] предложена методика оптимизационного расчета моментных двигателей, позволяющая повысить удельные показатели машины.

Наиболее реальным путем повышения коэффициента статической добротности является увеличение момента, развиваемого двигателем. Учитывая замечания, приведенные выше, основным приемом в данном случае является увеличение тока, протекающего по якорной обмотке. Для двигателя, являющегося магнитоэлектрическим, связь между моментом и током практически линейная. Потребление мощности из сети пропорционально квадрату протекающего по обмотке тока. Если обратиться к выражению для определения статической добротности, можно заметить, что увеличение тока в обмотке не должно существенно изменить эту характеристику. Однако в этом случае должен увеличиться основной параметр двигателя – развиваемый им момент. В ряде практических случаев это является основополагающим фактором. Однако, в случае протекания по обмоткам тока большой величины, возникают проблемы, связанные с тепловым режимом работы двигателя. Повышенная температура, вызванная протеканием по обмоткам большого тока, может привести к перегреву обмотки и ухудшить свойства постоянных магнитов. Различные приемы охлаждения обмоток, особенно принудительные с использованием воздуха и жидкости, существенно усложняют конструкцию электрической машины и ее эксплуатационные возможности [2]. На рисунках 1.7 и 1.8, соответственно,

приведены варианты использования систем жидкостного охлаждения моментных двигателей серии TMB фирмы ETEL [99] и серии 1FW6 фирмы Siemens [57].

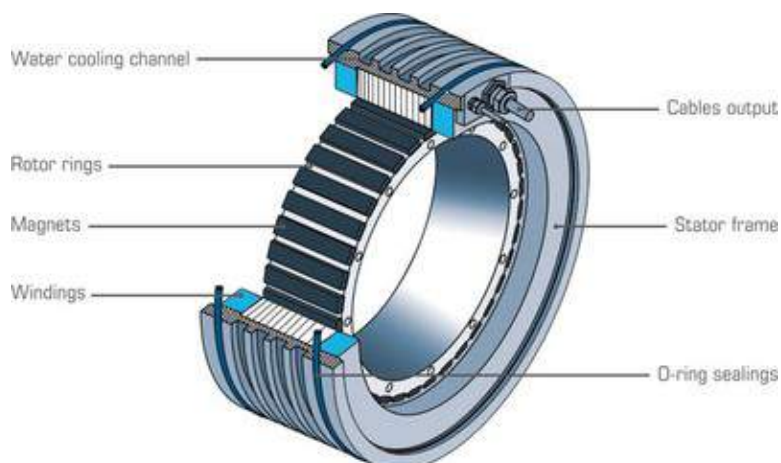


Рисунок 1.7 – Моментный двигатель серии TMB

На рисунке 1.7 показаны канал водяного охлаждения (Water cooling channel) и кольцевые уплотнения (O-ring sealings). На рисунке 1.8 показаны патрубки для подвода охлаждающей жидкости.



Рисунок 1.8 – Моментный двигатель серии 1FW6

Применение встроенного вентилятора, связанного с ротором, нерационально, так как не даст эффекта ввиду низкой скорости вращения ротора.

В данной ситуации предложено заменить традиционную обмотку двигателя ленточной намоткой [60]. Термин «намотка» в данном случае введен, во-первых, по причине существенного отличия такого активного элемента от существующих обмоток, выполненных обмоточным проводом, и, во-вторых, характер технологического выполнения представляет собой рулонную намотку ленты на основу (гильзу), связанную с корпусом (статором) двигателя. Такой вариант

исполнения активного элемента предложен в 2008 году в Томском политехническом университете В. М. Мартемьяновым [11, 60, 61]. Очевидные преимущества такого приема заключаются в новом конструкторско-технологическом подходе к разработке и изготовлению статора двигателя; возможности увеличения токовой нагрузки в связи с хорошим теплоотводом; возможности создания желаемой характеристики «момент-угол поворота ротора».

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию предложенной концепции.

1.7 Проводящая лента как основа активного элемента

Как указывалось выше, увеличения развиваемого двигателем момента можно добиться повышением тока, протекающего через обмотку якоря. Следует отметить что, реакция якоря в двигателях с ротором, состоящим из высококоэрцитивных редкоземельных магнитов, является незначительной [13]. Однако повышение тока будет ограничено максимально допустимой плотностью тока обмотки и тепловым сопротивлением, зависящим от сечения провода, варианта ее укладки в пазах якоря и пазовой изоляции. Таким образом, повышение тока с целью увеличения момента на валу двигателя может привести к разрушению провода обмотки. На основе анализа различных конструктивных решений, которыми характеризуются современные моментные двигатели, было принято решение предложить такой вариант обмотки, при котором выделяющееся в обмотке тепло по пути минимального теплового сопротивления сбрасывалось на корпус двигателя.

1.7.1 Взаимодействие проводника с током и магнитного поля

Рассмотрим схему взаимодействия тонкого проводника, по которому протекает ток, с магнитным полем. Предполагаем, что источник магнитного поля смонтирован на подвижном узле устройства. Опоры подвеса подвижного узла дают возможность источнику магнитного поля перемещаться в направлении оси

Х. Источник магнитного поля создает индукцию B в пределах прямоугольника со сторонами a – по оси X и b – по оси Y (рисунок 1.9).

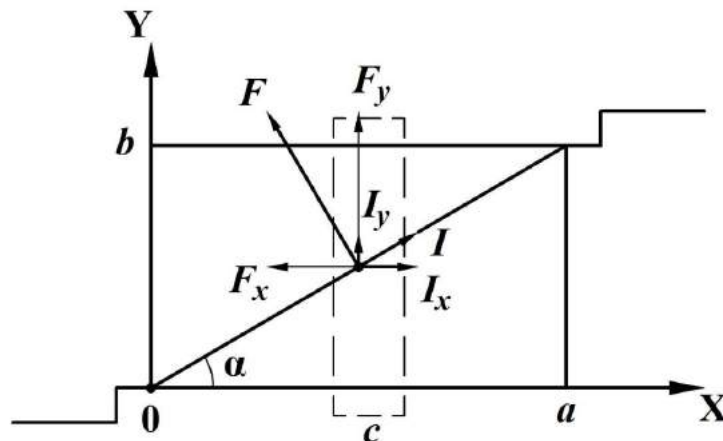


Рисунок 1.9 – Схема взаимодействия проводника с током и магнитного поля

Если по диагонали этого прямоугольника проложить тонкий проводник и пропустить по нему ток силой I , то на него будет действовать сила F [50]

$$F = I \cdot B \cdot l = I \cdot B \cdot c \cdot \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a},$$

где l – длина проводника в пределах действия магнитного поля; c – ширина источника магнитного поля.

Эта сила будет иметь две компоненты:

$$F_x = B \cdot l \cdot I \cdot \sin \alpha,$$

$$F_y = B \cdot l \cdot I \cdot \cos \alpha.$$

Первая из них будет вызывать относительное движение источника магнитного поля и проводника вдоль оси X , а вторая будет вызывать нагрузку на опоры подвеса. На рисунке 1.9 направления векторов компонент силы показаны в предположении, что силовые линии магнитного поля направлены перпендикулярно в плоскость рисунка. Сила F_x выталкивает проводник из магнитного поля, но если проводник зафиксирован неподвижно относительно основания, то эта сила вызовет движение источника магнитного поля в направлении оси X . На проявлении действия этой силы может быть построен электродвигатель [30, 60]. Нетрудно заметить, что величина этой силы зависит от I_y – поперечной составляющей тока

$$I_y = I \cdot \sin \alpha.$$

Сила, развиваемая таким устройством, может быть увеличена как за счет повышения индукции магнитного поля B , так и за счет выбора геометрии устройства – размеров a , b , c . Кроме того, увеличение развиваемого усилия может быть организовано использованием активной структуры из тонкого провода, когда проводники лежат в диагональных направлениях каждого слоя. Однако необходимый воздушный зазор магнитопровода источника магнитного поля, который в данном случае должен быть не менее произведения диаметра провода на число слоев, будет больше толщины традиционной обмотки.

Обратим также внимание на возможность увеличения протекающего по проводнику тока. Это увеличение будет возможно, пока повышение плотности тока не приведет к перегреву проводника, и следовательно, к его разрушению. Уменьшения перегрева можно добиться за счет охлаждения проводника при увеличении площади поверхности теплоотвода. В данном случае, плоская прямоугольная пластина из электропроводящего материала с размерами $a \cdot b$ (рисунок 1.9) может представить наибольшую поверхность охлаждения. Использование нескольких аналогичных пластин может увеличить силу, направленную вдоль оси X . Пластины подключаются к электрической цепи последовательно и в конструктивном отношении представляют единый пакет (рисунок 1.10). В этом случае силы F_x , создаваемые токами соседних пластин суммируются, а F_y вычитаются.

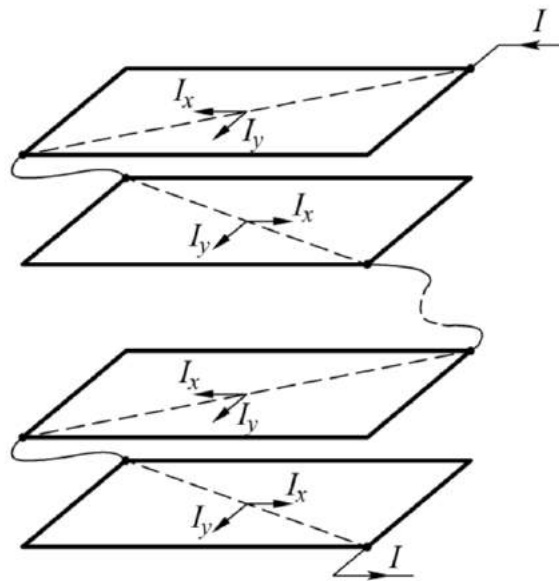


Рисунок 1.10 – Пакет пластин

1.7.2 Возможные варианты реализации двигателей с пакетным элементом

Простейшим примером реализации схемы взаимодействия неподвижного активного пакетного элемента с подвижным источником магнитного поля является линейный двигатель (рисунок 1.11) [30]. Направляющие 2 дают возможность постоянному магниту 1 перемещаться. Неподвижно связанный с основанием прибора пакет проводящих пластин 3 помещен в воздушный зазор постоянного магнита. Пластины в пакете разделены изолятором и связаны электрически при помощи перемычек 4.

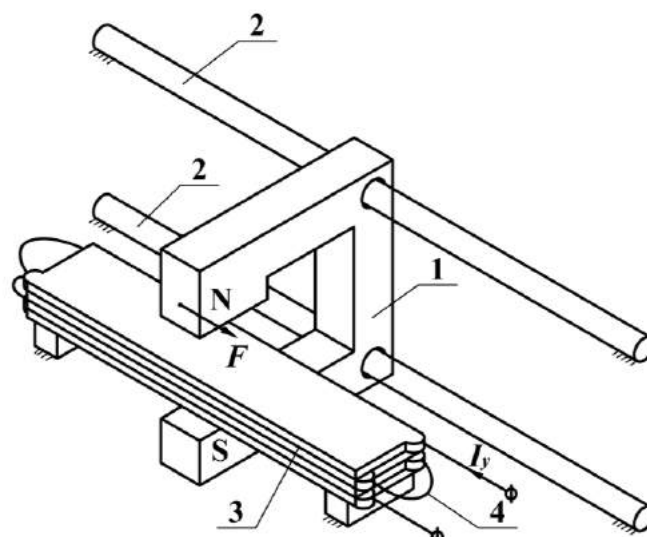


Рисунок 1.11 – Схема линейного двигателя с пакетным элементом

Если источник магнитного поля 1 (рисунок 1.11) будет зафиксирован относительно вертикальной оси с возможностью углового перемещения вокруг этой оси и вдоль пакетного элемента, то получим простейшую конструкцию моментного двигателя с пакетным элементом (рисунок 1.12) [60].

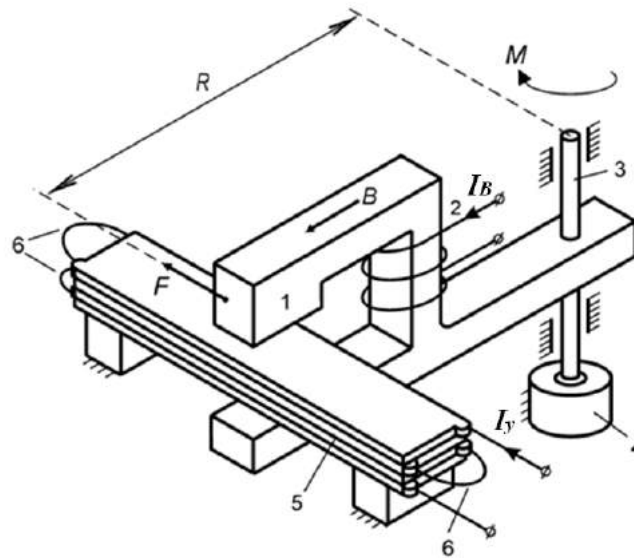


Рисунок 1.12 – Схема моментного двигателя с пакетным элементом

На рисунке 1.12 сердечник электромагнита 1 с обмоткой возбуждения 2 закреплены на валу 3, что дает возможность электромагниту вместе с нагрузкой 4 вращаться относительно корпуса. В зазоре сердечника электромагнита находится пакет 5 электропроводящих пластин, жестко связанный с корпусом прибора. Пакет состоит из четного количества пластин, поверхности которых параллельны поверхностям полюсов электромагнита. Перемычки 6 соединяют пластины последовательно в электрическую цепь. При пропускании по обмотке электромагнита тока возбуждения I_B и по пакету пластин тока управления I_y возникает сила F , которая на плече R создает момент $M = F \cdot R$.

Дальнейшее развитие предложенной концепции проявилось в создании ленточной намотки статора моментного двигателя с ограниченным рабочим диапазоном углов поворота ротора [54, 61], представленного на рисунке 1.13. Термин "намотка" применен во всех источниках, в которых опубликованы сведения о проведенных исследованиях. Автор, конечно, предполагает, что данный термин носит временный характер, так как дальнейшее развитие

конструкции и технологического исполнения с использованием аддитивных технологий уже не будет связано с процессом намотки.

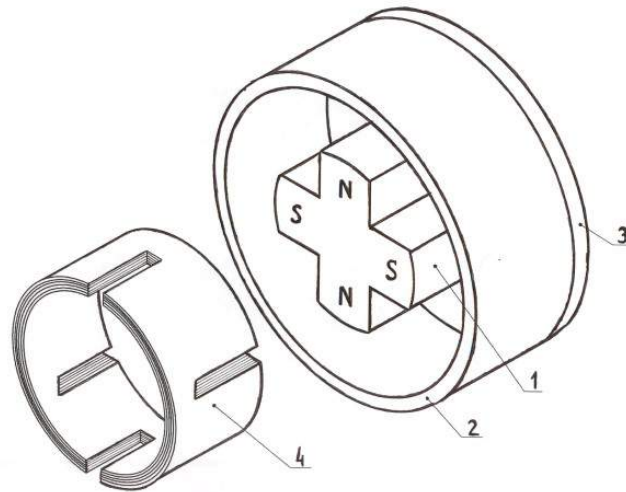


Рисунок 1.13 – Схема моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора

На рисунке 1.13 ротор двигателя представляет собой многополюсный постоянный магнит 1, соединенный с магнитопроводом 2 с помощью немагнитной диафрагмы 3. Активный элемент 4, представляющий собой спирально намотанную ленту из электропроводящего материала, помещается в зазор между многополюсным магнитом и магнитопроводом.

Лента покрыта слоем изоляционного материала. По боковым краям ленты имеются поперечные вырезы, которые при намотке образуют в активном элементе боковые пазы. Расстояние между центрами получившихся боковых пазов равно полюсному делению магнита. Если к началу и концу ленты подключить источник постоянного тока, то характер протекания тока определяется наличием в ленте поперечных вырезов. Поперечные составляющие этого тока, взаимодействуя с полем постоянного магнита, вызывают появление сил, создающих момент относительно оси вращения ротора моментного двигателя.

1.7.3 Технологические аспекты изготовления ленточной намотки

Ленточная намотка является неподвижной и размещается, путем наматывания ленты, на немагнитной гильзе, жестко соединенной с корпусом

двигателя. В качестве ленты для намотки предлагается использовать тонкостенную фольгу из электропроводящего материала, например, медную ленту [16, 17] толщиной 0,1 мм и шириной 50 мм. Фольга в намотке должна быть изолирована как минимум с одной стороны. Требования к электрической изоляции минимальны, поскольку разность потенциалов между двумя соседними слоями намотки не превышает U/N , где U – напряжение источника питания, N – число слоев намотки. Желательно, чтобы изоляция обеспечивала монолитность намотки, предохраняя ее от разматывания. В качестве такой изоляции можно применить специальное покрытие, которое используется для самоспекающихся обмоточных проводов Thermibond 158 [66].

Материал гильзы, на которую производится намотка ленты, должен исключать магнитное тяжение и обладать хорошей теплопроводностью для отвода тепла от намотки непосредственно на корпус двигателя и последующего его рассеяния в окружающей среде.

На рисунке 1.14 приведена возможная схема выполнения вырезов в ленте с помощью лазерной резки [37]. Гильза, на которую наматывается лента крепится на вал шагового двигателя, при повороте которого на заданный угол подается команда на выполнение резания лазерным лучом.

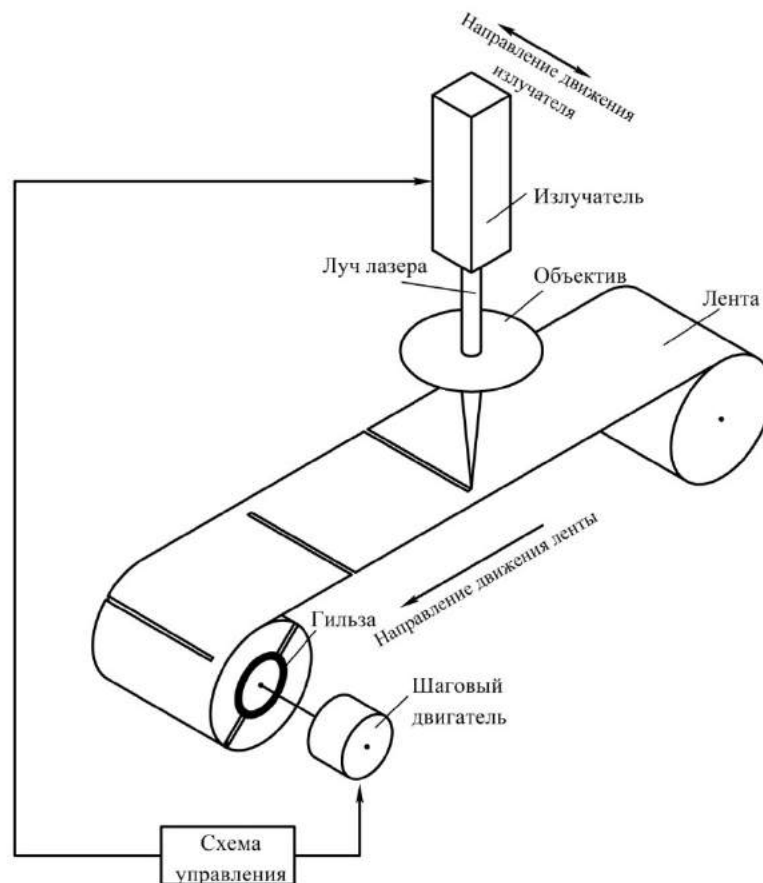


Рисунок 1.14 – Схема выполнения вырезов в ленте с помощью лазерной резки

В настоящее время в промышленное производство широко внедряются новые приемы изготовления, так называемые "аддитивные технологии". В этом случае необходимая конфигурация детали узла создается за счет постепенного нанесения слоя материала на предыдущий слой до тех пор пока размеры детали не станут такими, как задано чертежом.

Такой подход к изготовлению активного элемента в виде ленточной намотки представляется в перспективе наиболее предпочтительным. Процесс изготовления можно описать следующим образом: на основу (гильзу), выполненную из бериллиевой керамики – непроводящего материала, обладающего очень хорошей теплопроводностью, наносится металлическим порошком первый слой; затем этот слой покрывается тонким слоем изолятора (не исключено, что это также будет керамика), затем вновь создается металлический слой (второй "виток" намотки) и т.д., пока не получится активный элемент с заданными расчетно-конструктивными параметрами.

Выводы к главе 1

1. Рассмотрены различные варианты моментных двигателей с постоянными магнитами и предъявляемые к ним требования.
2. Указано современное состояние, связанное с разработкой и производством моментных двигателей в России и за рубежом.
3. Приведены пути возможного повышения удельных характеристик моментных двигателей. Указано, что наиболее вероятный путь лежит в повышении токовой нагрузки моментного двигателя за счет увеличения тока в обмотках. В этом случае возникает проблема качественного теплоотвода.
4. Предложено конструктивное исполнение активного элемента в виде пакета пластин или ленточной обмотки (намотки).
5. Рассмотрен вариант подхода к процессу изготовления ленточной намотки. Указано, что наиболее перспективным приемом является метод использования аддитивных технологий.

ГЛАВА 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИНЫ КАК ЭЛЕМЕНТА ЛЕНТОЧНОЙ НАМОТКИ

2.1 Пластина как элемент ленточной намоткой

На рисунке 2.1 представлена прямоугольная однородная пластина, выполненная из электропроводящего материала и подключенная к электрической цепи в точках, расположенных в вершинах ее диагонали.

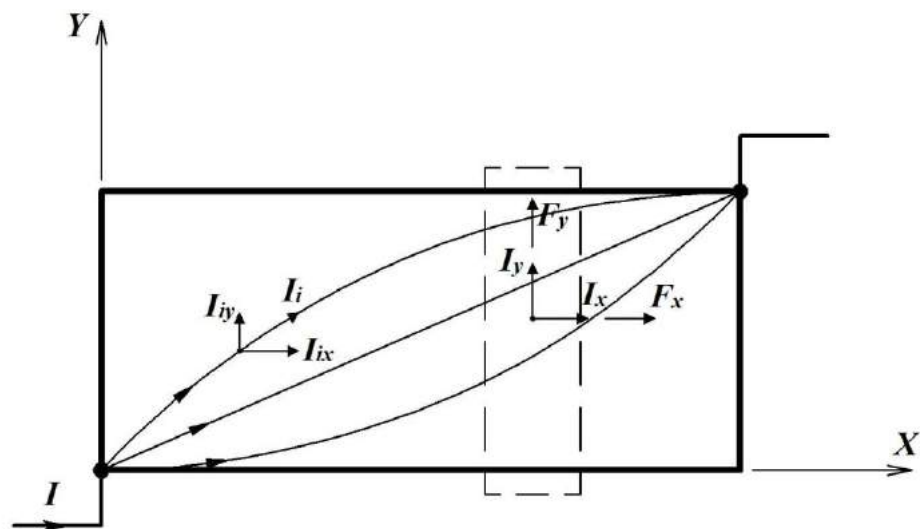


Рисунок 2.1 – Электропроводящая пластина

Распределенный ток, протекающий через пластину будут составлять токи I_i , имеющие в каждой точке две компоненты I_{ix} и I_{iy} . Суммирование токов, протекающих в зоне действия магнитного потока устройства, выделенного штриховой линией, покажет, что в данной области протекают две составляющие полного тока I_x и I_y . При этом значения данных составляющих будут определяться геометрией пластины. Ток I_y , взаимодействуя с источником магнитного поля, создает силу F_x , направленную по оси X, а ток I_x – силу F_y , направленную по оси Y. Данные силы будут вызывать взаимное перемещение пластины и источника магнитного поля. При этом действие силы F_y , создаваемой током I_x , будет компенсироваться в опорах подвеса источника магнитного поля, а сила F_x , вызванная током I_y , будет создавать необходимую силу для работы

двигателя. Создаваемая сила может быть увеличена последовательным электрическим подключением нескольких аналогичных пластин, которые формируются в единый пакет так, чтобы их поверхности были параллельны и разделены изолятором. Эффективность такого пакетного элемента будет пропорциональна количеству пластин.

Несколько последовательно соединенных и расположенных вдоль окружности пакетных элементов, обладающих идентичными характеристиками и находящихся под действием одного полюса магнитной системы электродвигателя [61], было предложено назвать ленточной намоткой или активным ленточным элементом, так как для изготовления намотки предложено использовать тонкую электропроводящую ленту. На рисунке 2.2 приведена развертка ленточной намотки.

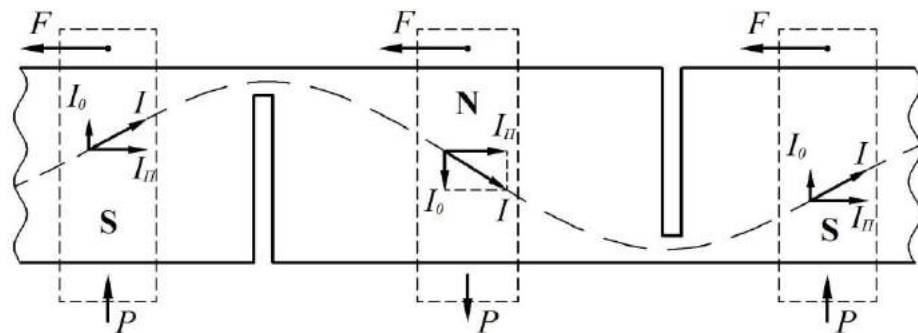


Рисунок 2.2 – Развертка ленточной намотки

Поперечные боковые вырезы формируют диагональный характер протекания тока I по элементам ленты между вырезами. Как указывалось ранее, распределенный ток I будет иметь две компоненты, в данном случае, продольную I_n и осевую I_o [61]. Предполагается, что полюсы магнитной системы ротора двигателя N и S находятся над плоскостью рисунка 2.2. При этом сила F , действующая на источник магнитного поля, будет появляться при взаимодействии осевых компонент тока I_o с магнитным полем, а суммарное действие этих сил вызовет появление момента, который будет стремиться повернуть магнитную систему относительно ленточной намотки, которая неподвижна и связана с корпусом двигателя. Силы P , вызванные продольными компонентами полного тока I_n будут действовать со стороны магнита на опоры

его подвеса. При одной паре полюсов магнитной системы эти силы создадут радиальную нагрузку на опоры подвеса двигателя. При большем числе пар полюсов будет происходить взаимная компенсация данных сил в осевом направлении, и соответственно отсутствовать радиальная нагрузка на опоры подвеса двигателя. В случае неизменной величины пропускаемого по намотке тока, развиваемый двигателем момент M будет зависеть от числа витков ленточной намотки N .

2.2 Сила взаимодействия магнитного поля и распределенного тока пластины

В связи с тем, что конструктивные решения двигателей с активным пакетным элементом и ленточной намоткой в литературе практически не отражены, потребовалось провести аналитические исследования для того, чтобы получить математическое обоснование предложенного варианта активного элемента.

2.2.1 Характер распределения тока

Поскольку величина силы, развиваемой двигателем с пакетным элементом, и ее направление определяются значением и направлением эквивалентного тока I , а также значением и направлением вектора индукции B , то отсюда следует, что основной задачей является определение характера распределения протекающего по пластине тока.

Реальный характер протекания тока по пластине имеет сложный вид. Полный ток, протекающий по пластине, выполненной из однородного материала и имеющей во всех ее точках постоянную толщину, является распределенным. Характер его распределения описывается уравнениями в частных производных [12, 56, 72]. Современным приемом численного решения таких уравнений методом конечных элементов является использование программного продукта COMSOL Multiphysics [51, 81].

Для решения задачи характера распределения тока по пластине, COMSOL предлагает ряд дифференциальных уравнений в частных производных [81]

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (2.3)$$

Приведенные уравнения относятся к уравнениям Максвелла. Уравнения Максвелла представляют собой набор уравнений в интегральной или дифференциальной форме, устанавливающих взаимодействие между фундаментальными электромагнитными величинами. К ним относятся:

- Напряженность электрического поля \mathbf{E} ;
- Электрическое смещение \mathbf{D} ;
- Напряженность магнитного поля \mathbf{H} ;
- Индукция магнитного потока \mathbf{B} ;
- Плотность тока \mathbf{J} ;
- Плотность электрического заряда ρ .

Выражение (2.1) представляет собой дифференциальную форму уравнения непрерывности. Если токи постоянны, то все электрические величины не зависят от времени и в уравнении непрерывности нужно положить $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ равным нулю.

Тогда $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$, следовательно, в случае постоянного тока вектор \mathbf{J} не имеет источников. Это означает, что линии тока нигде не начинаются и нигде не заканчиваются, то есть они замкнуты.

Соотношение (2.2) получается путем обобщения выражения для плотности тока при введении внешнего источника \mathbf{J}_e .

Выражение (2.3) формулирует проблему с точки зрения электрического скалярного потенциала V и магнитного векторного потенциала \mathbf{A} .

В результате численного моделирования задачи распределения тока, протекающего через тонкую электропроводящую пластину, в модуле Electric

Currents COMSOL Multiphysics получен вид линий тока, приведенный на рисунке 2.3 .

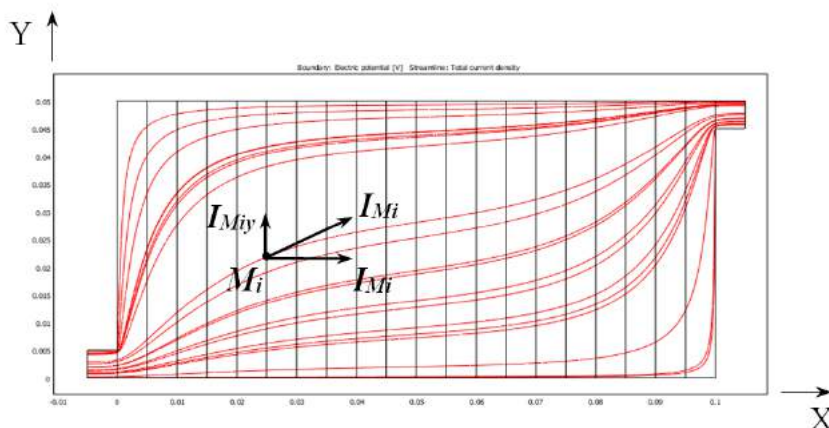


Рисунок 2.3 – Распределенный ток, протекающий по пластине

2.2.2 Сила, действующая на источник магнитного поля

В каждой точке M_i пластины элемент тока I_{Mi} имеет две компоненты: продольную I_{Mix} и поперечную I_{Miy} (рисунок 2.3). Если рассмотреть суммарное действие таких компонент, находящихся в зоне действия потока постоянного магнита с индукцией B , направленного нормально к поверхности пластины, то ток $I_x = \sum_{i=1}^n I_{Mix}$ вызовет механическую силу F_y , действующую вдоль оси Y (поперек пластины), а ток $I_y = \sum_{i=1}^n I_{Miy}$ вызовет силу F_x , действующую вдоль пластины и необходимую для работы двигателя. В дальнейшем будем рассматривать только действие силы F_x и вызвавшего ее тока I_y , который будем называть "поперечным".

В каждой точке пластины ток определяется некоторой плотностью тока $\vec{j}(x, y)$, которая зависит от характера распределения тока по пластине. Выберем точку $M(x_M, y_M)$, лежащую на поверхности пластины (рисунок 2.4). В этой точке имеется элемент тока, плотность которого характеризуется величинами j_{Mx} и j_{My} . Считаем, что плотности тока будут такими же в точках с координатами x_M и y_M во всех слоях пластины. Величина тока, протекающего по элементарному сечению $dx \cdot dz$ (рисунок 2.4) в направлении оси Oy определится как

$j_{My}(x, y) \cdot dx \cdot dz$. В данном случае ось Oz направлена вдоль толщины Δ пластины. В окрестности выбранной точки M выберем элемент тока на участке dy : $j_{My}(x, y) \cdot dx \cdot dz \cdot dy$.

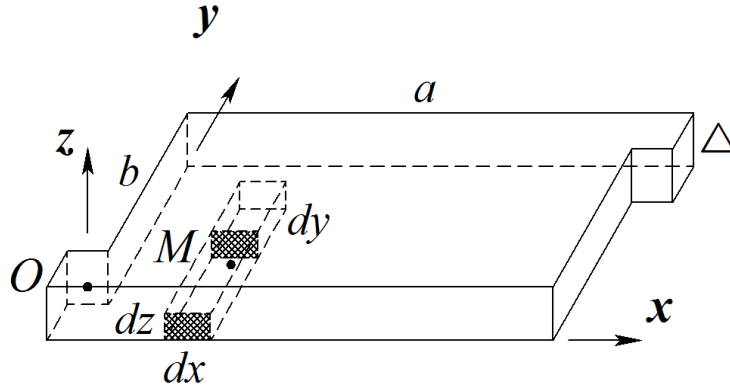


Рисунок 2.4 – Элемент тока в окрестности точки M

Элементарная сила dF_x , создаваемая указанным элементом тока в магнитном поле с индукцией B , направленная по оси Ox , выражена следующим образом

$$dF_x = B \cdot j_{My}(x, y) \cdot dx \cdot dy \cdot dz.$$

Сила, создаваемая совокупностью элементов тока, находящихся в окрестностях всех точек, принадлежащих зоне действия магнитного потока, определится как:

$$F_x = B \cdot \int_{(x-c/2)}^{(x+c/2)} \int_0^b \int_0^\Delta j_y(x, y) \cdot dx \cdot dy \cdot dz. \quad (2.4)$$

В данном случае полагаем, что индукция магнитного потока B неизменна во всех точках. По оси Ox рассматривается диапазон от $(x - c/2)$ до $(x + c/2)$, по оси Oy – диапазон от 0 до b ; по оси Oz – диапазон от 0 до Δ . Здесь b – ширина пластины, Δ – ее толщина, c – ширина постоянного магнита (считаем, что сечение магнитного потока, пронизывающего пластину, соответствует геометрии магнита).

Если учесть замечание, что компонента плотности тока j_y одна и та же для точек с одинаковыми координатами (x_i, y_i) , лежащих во всех слоях пластины, то есть не зависит от координаты z , выражение (2.4) запишем в виде:

$$F_x = B \cdot \Delta \cdot \int_{(x-\frac{c}{2})}^{(x+\frac{c}{2})} \int_0^b j_y(x, y) \cdot dx \cdot dy. \quad (2.5)$$

В дальнейшем, для упрощения записи двойного интеграла в выражении (2.5) введем обозначение

$$D(x, y) = \int_{(x-\frac{c}{2})}^{(x+\frac{c}{2})} \int_0^b j_y(x, y) dx dy. \quad (2.6)$$

Основной проблемой при расчете развиваемой силы согласно выражению (2.5) является определение величины двойного интеграла от компоненты плотности тока.

2.2.3 Прием построения зависимости "сила-перемещение".

Вид зависимости

Первоначально задача построения зависимости "сила-перемещение" решалась качественно, с использованием законов электростатики [36]. При этом была выявлена лишь тенденция изменения силы; необходимые математические выражения для получения данной зависимости в практических целях получить не удалось. В дальнейшем построении зависимости силы F_x , развиваемой двигателем по длине пакета, был использован COMSOL Multiphysics [81].

В процессе аналитических компьютерных исследований задавалась геометрия реальной пластины. Геометрическое описание пластины составлялось из отдельных подобластей, объединяя которые, можно моделировать взаимное расположение магнита относительно пластины (рисунок 2.5). В данном случае пластина разбита на 20 подобластей, следующих друг за другом в направлении перемещения магнита; магнитный поток пронизывает одновременно 4 подобласти. На рисунке 2.5 действие магнитного потока выделено цветом, показано четвертое положение магнита.

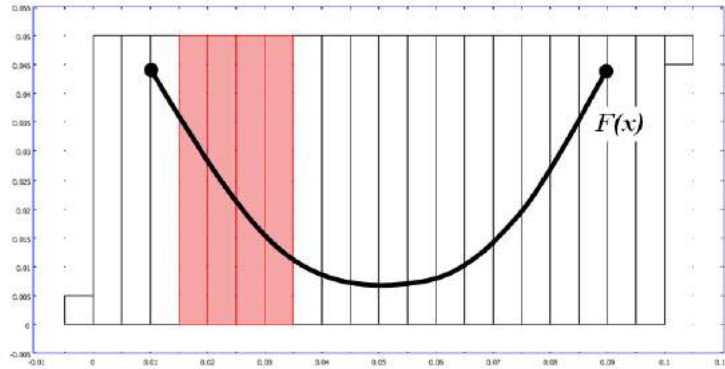


Рисунок 2.5 – Характер разбиения пластины на подобласти интегрирования

В результате интегрирования и последующей обработки результатов получена зависимость распределения силы, создаваемой взаимодействием распределенного по пластине тока и постоянного магнита – источника магнитного поля. На рисунке 2.5 такая зависимость представлена кривой $F(x)$, наложенной на габариты пластины. Крайние точки этой кривой на рисунке 2.5 соответствуют случаю, когда источник магнитного поля находится у краев пластины.

Для макета моментного двигателя с ленточной намоткой, описание и характеристики которого приводятся в главе 4 настоящей работы, была построена характеристика "момент-угол поворота" численным методом, предложенным выше. Вид полученной характеристики представлен на рисунке 2.6 кривой 1. На этом же рисунке приведена характеристика, полученная экспериментально (кривая 2) с достоверностью 90 %.

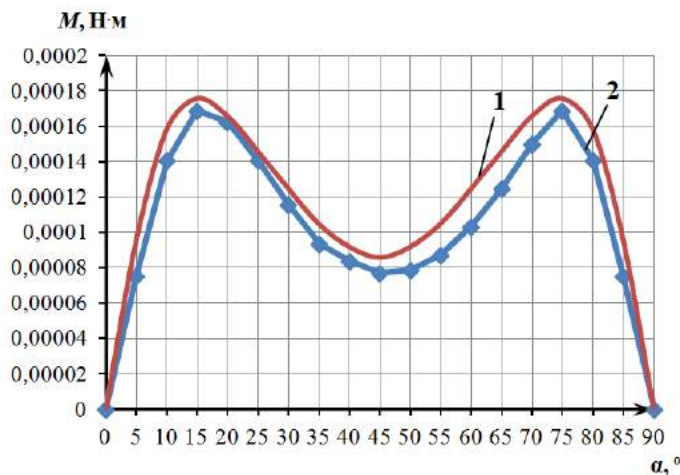


Рисунок 2.6 – Характеристики "момент-угол поворота ротора", полученные численным методом и экспериментально

Предложенный прием может быть применен при условии, что магнитное поле под полюсом является однородным. На практике оно является неоднородным. Рассмотрим прием получения зависимости силы от перемещения магнита полюса в данном случае. При этом необходимо разбить площадь сечения потока, пронизывающего пластину на ряд подобластей (ячеек), в каждой из которых можно считать, что компонента индукции, нормальная к плоскости пластины, практически во всех точках ячейки одна и та же. Точно такие же по геометрии ячейки выбираются и на поверхности пластины для определения величин двойных интегралов плотности тока. Затем производится вычисление силы, создаваемой совокупностью действия потоков и токов всех выбранных ячеек. Длина ячеек (вдоль длины пластины) определяется минимально возможным шагом перемещения полюса; ширина может быть различной, но для повышения точности расчетов ее желательно иметь как можно меньше.

Несмотря на все попытки конструктивными приемами сосредоточить магнитный поток электрической машины строго под полюсом, фактически этот поток будет распределен на всю длину полюсного деления, то есть на всю длину пластины. Так как кривая зависимости силы от перемещения может быть построена путем пошагового перемещения магнита, то размеры ячеек, связанные с магнитным потоком и с пластиной, должны быть одинаковыми. На рисунке 2.7 приведена таблица, отражающая величины индукции B_{ij} и двойного интеграла D_{ij} в каждой выбранной ячейке. В данном случае i – номер ячейки по длине пластины, j – по ширине последней; $i(1,2,\dots,n), j(1,2,\dots,m)$.

B_{11} / D_{11}	B_{21} / D_{21}	...	B_{i1} / D_{i1}	...	B_{n1} / D_{n1}
B_{12} / D_{12}	B_{22} / D_{22}	...	B_{i2} / D_{i2}	...	B_{n2} / D_{n2}
...
B_{1j} / D_{1j}	B_{1j} / D_{1j}	...	B_{ij} / D_{ij}	...	B_{nm} / D_{nm}

Рисунок 2.7 – Связь величин индукции и двойных интегралов выбранных ячеек

Приведенная в таблице связь соответствует случаю, когда магнит, а точнее его центр, находится в центре пластины. При длине пластины равной a , это положение соответствует $(a/2)$. Развиваемая при этом сила определится как

$$F_0 = \Delta \cdot \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} B_{ij} \cdot D_{ij}.$$

Следующее значение силы можно будет определить в точке, отстоящей от центра справа на расстоянии $a_я$, равной длине выбранной ячейки. При высказанных выше замечаниях $a_я = a/n$. После заданного таким образом перемещения магнита, значение создаваемой силы в точке $(a/2 + a_я)$ определится как

$$F_1 = \Delta \cdot \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} B_{ij} \cdot D_{(i+1), j}.$$

Индекс "1" у обозначения силы говорит о том, что сделан первый шаг перемещения. Рассуждая подобным образом, на N -ом шаге получим

$$F_N = \Delta \cdot \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} B_{ij} \cdot D_{(i+N), j}.$$

Аналогично можно получить значения действующей силы и при перемещении магнита влево от центра пластины. Приведенные выше рассуждения сделаны при следующих допущениях:

- при протекании по пластине неизменного тока значения двойных интегралов в каждой ячейке остаются постоянными;
- величины индукции в ячейках при всех положениях магнита также не меняются.

Последнее допущение возможно только при игнорировании влияния тока пластины на магнитный поток (реакции якоря). При протекании значительных токов по пластине эффект реакции якоря должен учитываться тем, что значения индукции в ячейках должны определяться (в том числе и численными методами) при каждом шаге перемещения магнита.

2.3 Формирование силовой характеристики дополнительными боковыми вырезами

В практических целях характеристика развиваемой силы, полученная на рисунке 2.5, не всегда будет соответствовать необходимым требованиям. При решении конкретной задачи может возникнуть потребность в формировании необходимой функциональной зависимости развиваемой силы, которая наиболее полно удовлетворяет требованиям данной задачи. Рассмотрим варианты формирования необходимой зависимости силовой характеристики с помощью дополнительных боковых вырезов.

В работах [67, 73, 83] экспериментально показано, что с помощью боковых вырезов в пластине можно изменять вид силовой характеристики. Вырезы создают эффект сосредоточения тока. Воспользуемся таким приемом и получим рекомендации для определения параметров вырезов с целью реализации заданной силовой характеристики.

В представленном ниже выражении для развиваемой силы $F_x(x)$ такие величины как индукция B , сила сосредоточенного тока I и ширина магнита c постоянны. Развиваемая сила в каждой точке с координатой x_i зависит от угла наклона токовой линии к оси абсцисс (рисунок 2.8)

$$F_{x_i} = B \cdot I \cdot c \cdot \operatorname{tg} \alpha_i,$$

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{F_{x_i}}{B \cdot I \cdot c}.$$

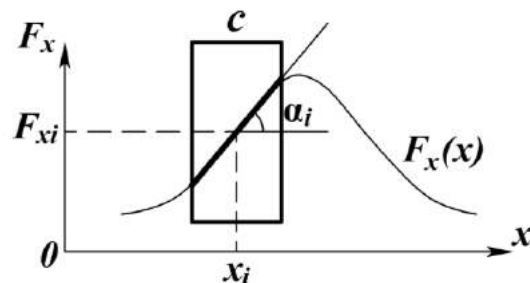


Рисунок 2.8 – Создание силы $F_x(x)$ сосредоточенным проводником

В пределе, токовую линию можно предположить совпадающей с касательной к кривой линии сосредоточенного тока. Если учесть, что геометрический смысл производной это тангенс угла наклона касательной к

графику функции, то кривая изменения желаемой силы $F_x(x)$ может рассматриваться как график производной от функции, отображающей траекторию токовой линии. Последнюю можно получить интегрированием зависимости желаемой силовой характеристики

$$y_{жел}(x) = \frac{1}{B \cdot I \cdot c} \int_{x_0}^x F_x(x) dx.$$

Данную характеристику можно получить с помощью выполнения дополнительных боковых вырезов. Получение такой характеристики с помощью пакета COMSOL Multiphysics показано на рисунке 2.9, где сформированная вырезами токовая линия обозначена штриховой линией.

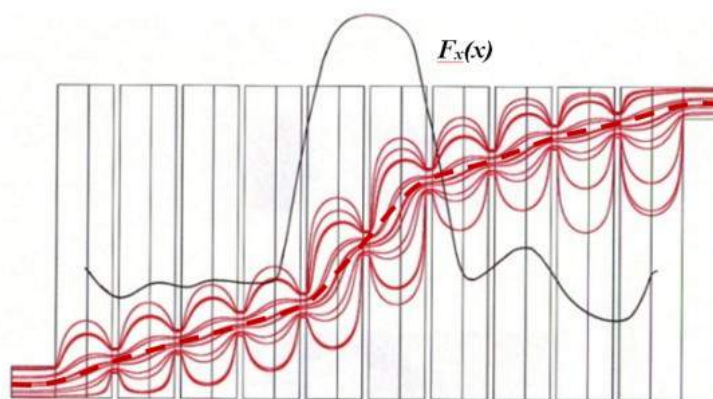


Рисунок 2.9 – Получение желаемой силовой характеристики

Практический подход к выбору геометрии боковых вырезов представлен ниже.

Предположим, что сосредоточенный ток протекает по бесконечно тонкому проводнику, произвольно уложенному в пределах размеров (a, b) пластины. Размер b будем называть расчетной шириной пластины. Начало и конец проводника находятся в точках O и A (рисунок 2.10).

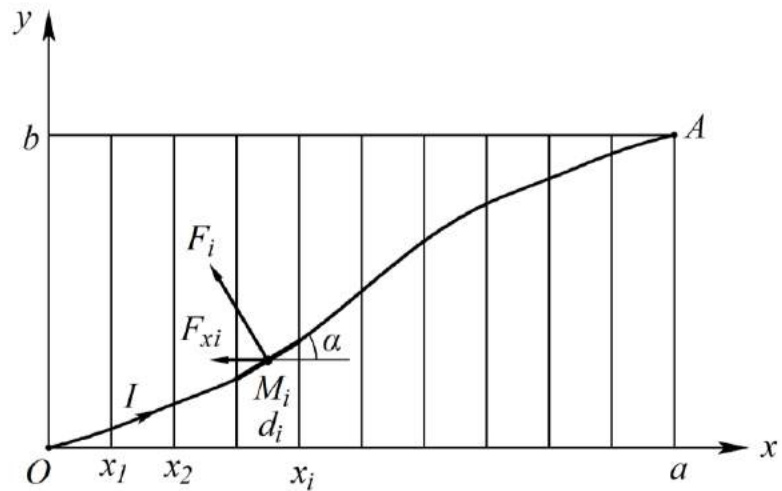


Рисунок 2.10 – Проводник произвольной формы

Разобьем площадь $ObAa$ на N отдельных прямоугольных зон, в пределах которых элементы проводника можно считать прямолинейными. Ширину каждой зоны обозначим как d_i . Внутри каждой зоны на элементе проводника выберем точку M_i . Ток I , протекающий через эту точку, будет таким же во всех точках проводника. Считаем, что рассматриваемая зона пронизывается магнитным потоком с индукцией B ; для определенности примем, что этот поток направлен в плоскость рисунка. На выбранный участок проводника будет действовать сила

$$F_i = B \cdot I \cdot l_i = B \cdot I \cdot \frac{d_i}{\cos \alpha_i},$$

где l_i – длина проводника в выбранной зоне; α_i – угол наклона участка проводника к направлению оси Ox .

Составляющая этой силы F_{xi} определится как

$$F_{xi} = B \cdot I \cdot \frac{d_i}{\cos \alpha_i} \cdot \sin \alpha_i = B \cdot I \cdot d_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_i. \quad (2.7)$$

Решаем обратную задачу. По предложенному характеру изменения силы $F(x)$ необходимо найти точки, через которые должен быть проложен проводник с током (рисунок 2.11).

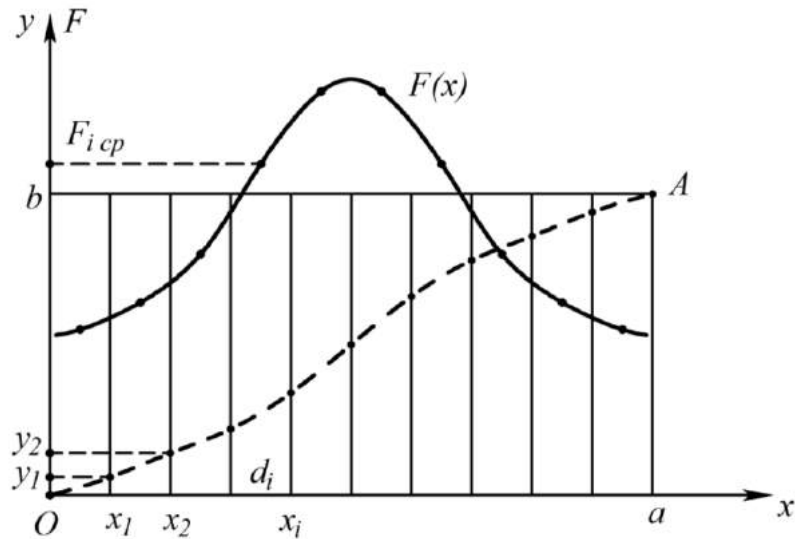


Рисунок 2.11 – Связь силовой характеристики и конфигурации проводника с током

На данном рисунке совмещены график изменения силы $F(x)$ и геометрия пластины; при этом также показаны интервалы d_i , которые для упрощения дальнейших выводов примем равными ширине магнита: $d_i=c$. Каждому из интервалов соответствует среднее значение силы $F_{i\text{cp}}$. Точки, через которые должен быть проложен проводник с током, определим следующим образом. Из полученного выражения (2.7) следует

$$\operatorname{tg}\alpha_i = \frac{F_{i\text{cp}}}{B \cdot I \cdot d_i}.$$

В точке x_1 , на границе интервалов d_1 и d_2 ордината конечной точки отрезка проводника будет

$$y_1 = d_1 \cdot \operatorname{tg}\alpha_1 = d_1 \cdot \frac{F_{1\text{cp}}}{B \cdot I \cdot d_1} = \frac{F_{1\text{cp}}}{B \cdot I}.$$

Ордината конечной точки отрезка на втором интервале

$$y_2 = y_1 + d_2 \cdot \operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{F_{1\text{cp}}}{B \cdot I} + d_2 \cdot \frac{F_{2\text{cp}}}{B \cdot I \cdot d_2} = \frac{1}{B \cdot I} (F_{1\text{cp}} + F_{2\text{cp}}).$$

Аналогично, ордината конечной точки отрезка на n -ом интервале

$$y_n = \frac{1}{B \cdot I} \sum_{i=1}^n F_{i\text{cp}}. \quad (2.8)$$

Ордината y_N конечной точки последнего интервала d_N должна быть равна расчетной ширине пластины b . Если это условие не выполняется, то необходимо ввести коэффициент

$$k = \frac{y_N}{b \cdot B \cdot I} \sum_{i=1}^N F_{icc},$$

с помощью которого необходимо изменить ординаты, определяемые выражением (2.8).

Окончательно, координаты точек $M_n(x_n, y_n)$, через которые должен быть проложен проводник с током, определяются следующим образом

$$\begin{aligned} x_n &= \sum_{i=1}^n d_i; \\ y_n &= \frac{1}{k \cdot B \cdot I} \sum_{i=1}^n F_{icc}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

На рисунке 2.11 полученные подобным образом точки объединены штриховой линией, которая отображает искомую форму проводника.

Приведенные выше выкладки относятся к случаю, когда необходимая функциональная зависимость $F(x)$ задается сосредоточенным током, протекающим по тонкому проводнику. Получение требуемой силовой характеристики, создаваемой током, протекающим по пластине, как указано ранее, может быть реализовано с помощью боковых вырезов. Геометрия этих вырезов такова, что их ширина должна иметь минимально возможный размер, обеспечиваемый инструментом, а длина – определяться по зависимостям, вытекающим из (2.9). Расположение вырезов вдоль длины пластины должно соответствовать границам выбранных интервалов d_i .

Так как полученные выше результаты (2.9) относятся к случаю, когда размеры сечения проводника являются бесконечно малыми, требуется коррекция этих результатов с учетом того, что ток должен протекать по сечению, площадь которого S конечна и определена допустимой плотностью тока. Линейный размер сечения, лежащий в плоскости пластины, определяется следующим образом

$$\delta = \frac{S}{\Delta}.$$

Полагая, что крутизна линий тока не столь велика, будем считать, что размер δ отсчитывается по направлению оси Oy .

Вырезы, выполненные с нижней и верхней кромок пластины, обеспечивающие необходимый размер δ (рисунок 2.12), должны заканчиваться в точках

$$y_{Hn} = y_n - \frac{\delta}{2}, \quad y_{Bn} = y_n + \frac{\delta}{2}.$$

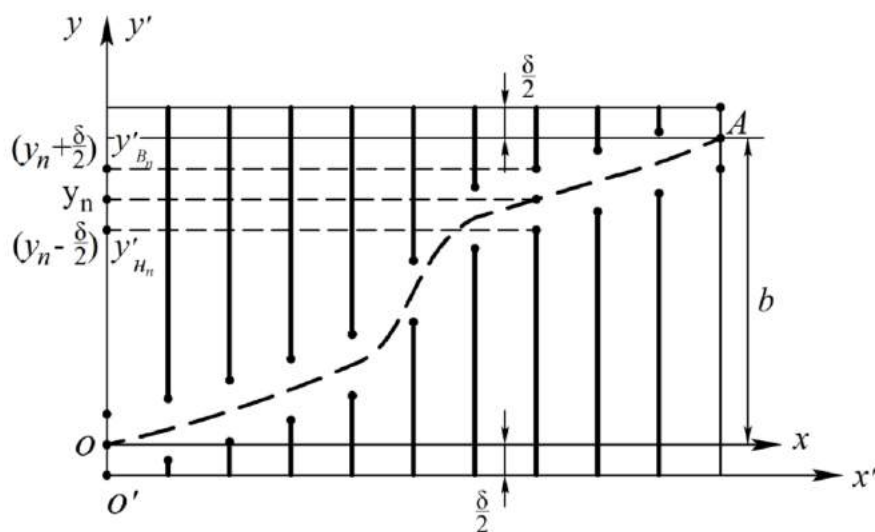


Рисунок 2.12 – Картина расположения боковых вырезов

В связи с тем, что

$$y_{H_0} = 0 - \frac{\delta}{2} = -\frac{\delta}{2}, \quad y_{B_N} = y_N + \frac{\delta}{2} = b + \frac{\delta}{2},$$

реальная ширина b' пластины должна быть больше расчетной b :

$$b' = b + \delta.$$

В этом случае отсчет ординат конечных точек вырезов производится от нижней кромки реальной геометрии пластины, т.е. в системе координат $O'x'y'$.

$$\begin{aligned} y'_{Hn} &= y_n - \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} = y_n, \\ y'_{Bn} &= y_n + \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} = y_n + \delta. \end{aligned} \quad (2.10)$$

На практике задача решается следующим образом. По известной (заданной) ширине пластины b' , максимальному току I , допустимой плотности тока, определяется зазор δ между двумя (верхним и нижним) боковыми вырезами.

Затем находится расчетная ширина пластины b , и, пользуясь выражениями (2.9) и (2.10), определяются размеры вырезов, обеспечивающие необходимую силовую характеристику двигателя.

Равномерную силовую характеристику можно получить при выполнении в теле пластины девяти дополнительных вырезов, обеспечивающих концентрацию линий тока в диагональном направлении [67] (рисунок 2.13).

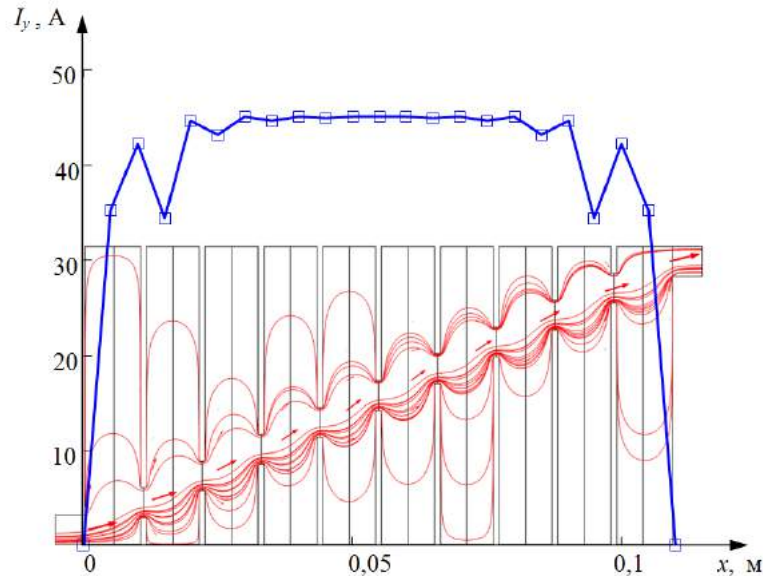


Рисунок 2.13 – Вид силовой характеристики с диагональной концентрацией токовых линий

Недостатком пластины с полученной характеристикой является большое количество теплонапряженных зон, обусловленных большим числом дополнительных боковых вырезов и, соответственно, большим числом мест сужения пластины с повышенной плотностью тока. Выходом из данной ситуации является наложение друг на друга пластин, у которых расположение дополнительных смежных вырезов не совпадает, как показано на рисунке 2.14 [74].

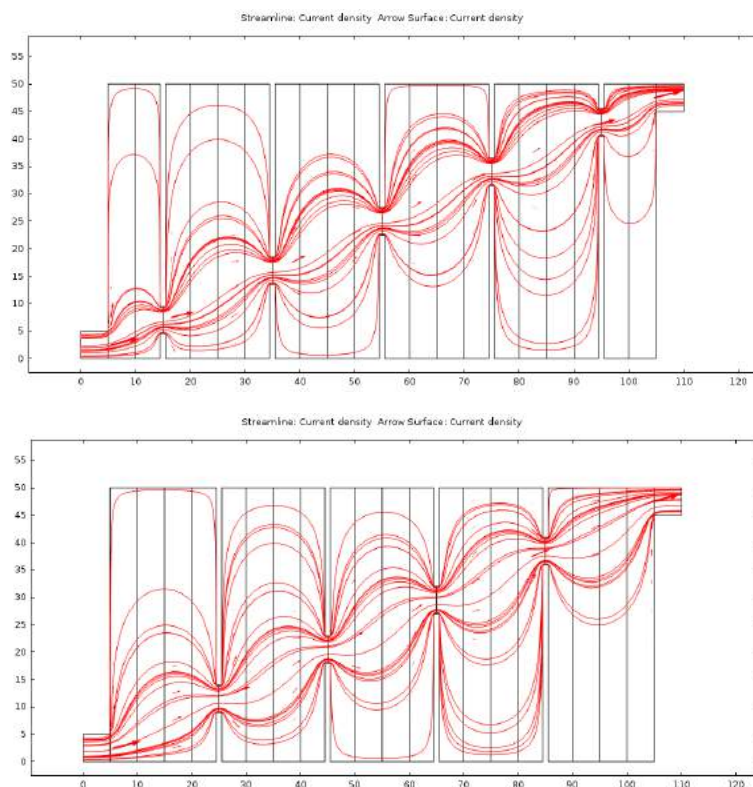


Рисунок 2.14 – Характер распределения тока по пластинам с 4 и 5 дополнительными вырезами

Внешний вид результирующей силовой характеристики двух таких пластин, образованной при геометрическом сложении силовых характеристик пластины с 5 вырезами (кривая 1 на рисунке 2.15) и пластины с 4 вырезами (кривая 2 на рисунке 2.15), показан на рисунке 2.15 кривой 3.

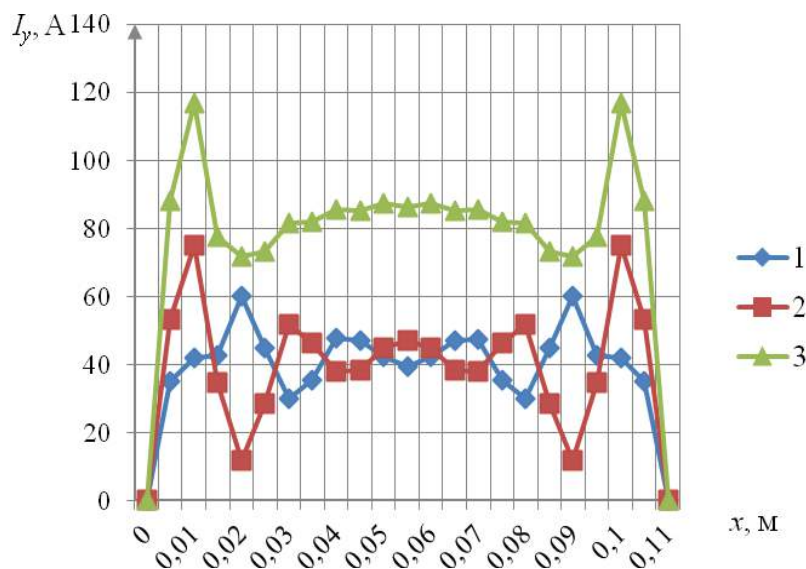


Рисунок 2.15 –Силовые характеристики пластин

На рисунке 2.15 по краям пластины силовая характеристика имеет нулевые значения, так как при ее построении предполагалось, что слева и справа от

рассматриваемой пластины расположены аналогичные пластины, "поперечные" токи которых имеют противоположное направление.

Несмотря на возможность получения требуемой характеристики $F(x)$, большое количество вырезов приводит к увеличению зон повышенного тепловыделения. Желаемую силовую характеристику также можно получить и при существенном сокращении числа вырезов. В некоторых случаях необходимо иметь характеристику близкую к треугольной форме (рисунок 2.16,а) [20]. Это достигается выполнением всего двух дополнительных вырезов, при этом необходимо учитывать действие пластин, расположенных слева и справа от данной (рисунок 2.16,б). Наличие именно "треугольной" зависимости силовой характеристики может оказать положительный эффект в вентильном двигателе (см. п. 3.7 настоящей работы).

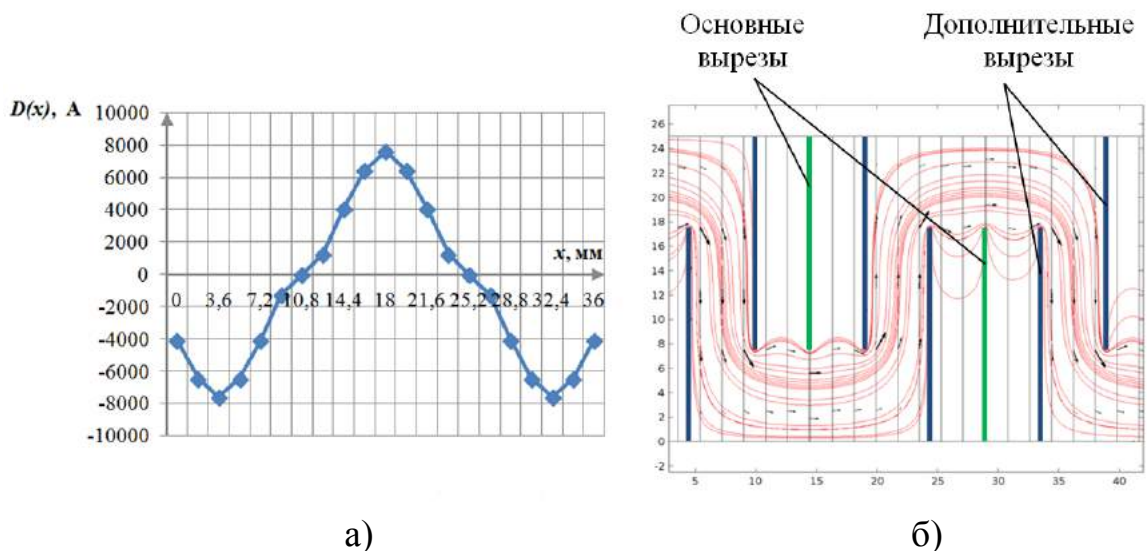


Рисунок 2.16 – "Треугольная" зависимость усилия: а) вид силовой характеристики; б) вид ленточной намотки с вырезами

2.4 Влияние размеров контактов на характеристику развиваемой силы

Проведем оценку влияния геометрии контакта приложения напряжения на силовую характеристику пластины.

Сила, действующая со стороны пластины с током на постоянный магнит, определяется выражением (2.5). Двойной интеграл в приведенном выражении

определяется с помощью интегрирования в программном продукте COMSOL компоненты плотности тока j_y .

Введем понятие относительной ширины контакта $\beta_k = b_k/b$, где b_k – ширина контакта (рисунок 2.17).

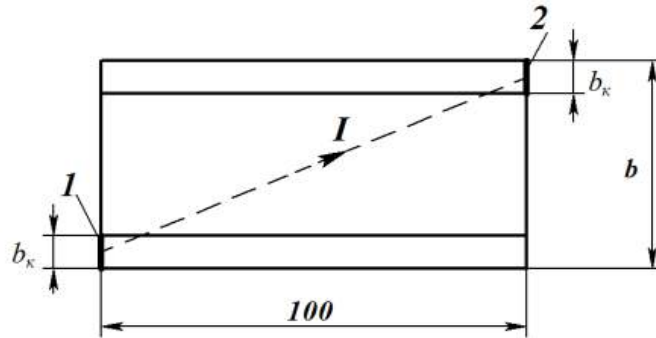


Рисунок 2.17 – Единичная пластина

Для проведения численного анализа выбраны следующие параметры: $a=100$ мм; $c=20$ мм; $B=0,2$ Тл; $\Delta=0,1$ мм; $b=50$ мм. Относительную ширину контакта задавали в диапазоне $\beta_k = 0,1 \div 0,5$, так при $\beta_k > 0,5$ часть тока будет протекать параллельно длине пластины, поперечные составляющие тока I_y уменьшатся, и полезный эффект эта часть тока создавать не будет.

Значение тока I , протекающего через контакт, при неизменном напряжении $U=0,01$ В, приложенном к пластине между контактами 1 и 2, зависит от относительной ширины контакта β_k , так как при изменении площади поперечного сечения контакта изменяется активное сопротивление пластины и ток I , что демонстрируется результатами численного эксперимента (рисунок 2.18).

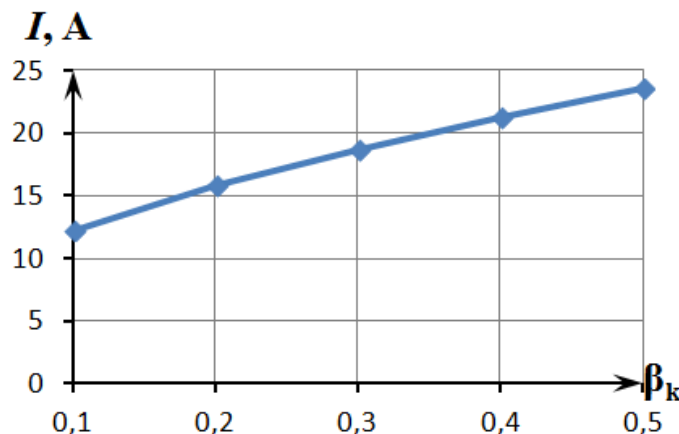


Рисунок 2.18 – Зависимость тока от ширины контакта при неизменном напряжении

Численными методами показано, что величина двойного интеграла, определяемого выражением (2.6) линейно зависит от тока, протекающего через контакт пластины. Поэтому выражение (2.5) запишем в виде

$$F_x = \frac{B \cdot \Delta}{I_0} \cdot I(\beta) \cdot D(x, y, I_0, \beta_k), \quad (2.11)$$

где $I_0 = 1$ А – начальное значение тока, протекающего через контакт; $D(x, y, I_0, \beta_k)$ – значение двойного интеграла, определяемое каждый раз при токе I_0 для различных значений β_k .

На рисунке 2.19 показан график изменения величины двойного интеграла при вариации относительной ширины контакта. Кривая 1 относится к случаю, когда источник магнитного поля находится у края пластины, кривая 2 – в центре пластины. Результаты получены при условии, что через контакты протекает неизменный ток I_0 .

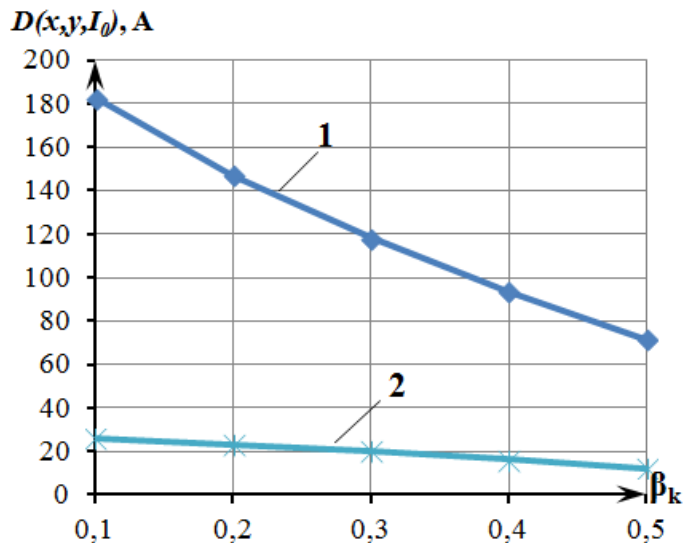


Рисунок 2.19 – Зависимость двойного интеграла от относительной ширины контакта при неизменном токе

Падающий характер данной характеристики объясняется тем, что при увеличении относительной ширины контакта линии распределенного тока, протекающего по пластине становятся менее крутыми (рисунок 2.20), уменьшаются поперечные составляющие плотности тока j_y , которые подвергаются интегрированию.

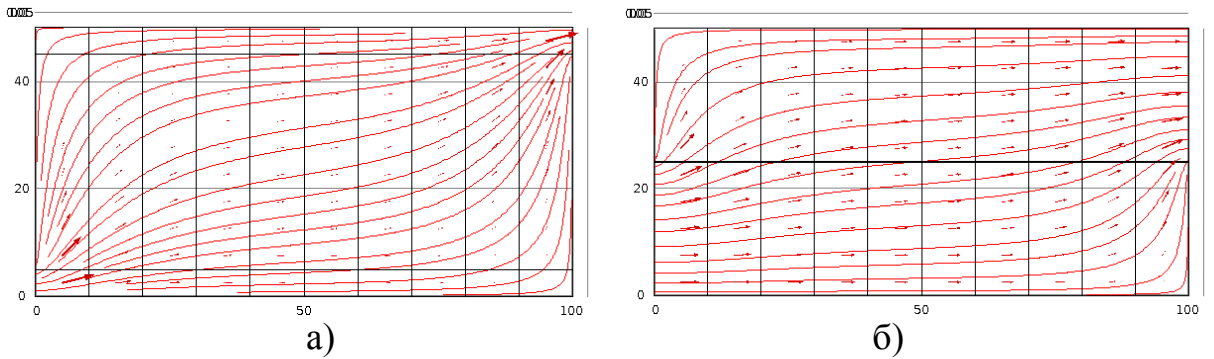


Рисунок 2.20 – Вид линий тока, протекающего по пластине:
а – при $\beta_k = 0,1$; б – при $\beta_k = 0,5$

Таким образом, при увеличении β_k наблюдается как увеличение тока $I(\beta)$, так и уменьшение величины двойного интеграла $D(x, y, I_0, \beta_k)$, то есть проявляется одновременное действие двух противоположных тенденций, влияющих на величину развиваемой силы. Результирующая сила (2.11), являющаяся произведением отображенных выше функций, имеет вид, представленный на рисунке 2.21. В связи с тем, что обе функции имеют нелинейный характер, выражение для силы имеет экстремум при некотором значении относительной величины контакта [28, 68].

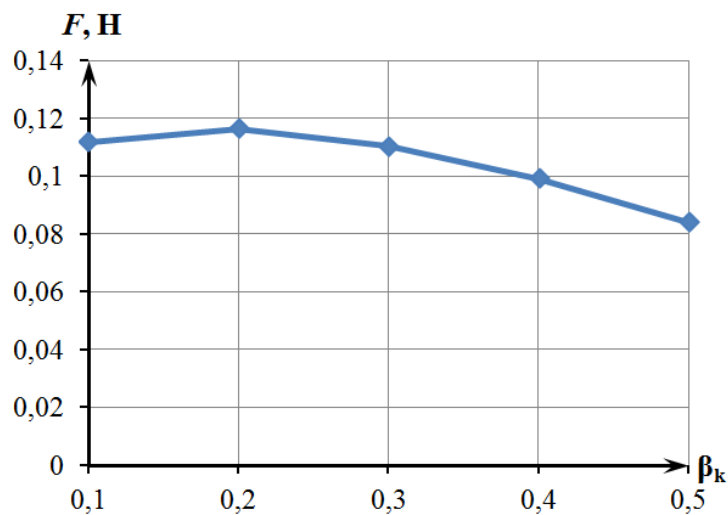


Рисунок 2.21 – Зависимость результирующей силы от относительной ширины контакта

2.5 Сопротивление единичной пластины. Зависимость электрического сопротивления пластины распределенному току от ее длины

Проведем оценку сопротивления пластины в зависимости от геометрических параметров последней. Для определения сопротивления единичной пластины R_i в модуле Electric Currents COMSOL Multiphysics построена геометрическая модель пластины (рисунок 2.22).

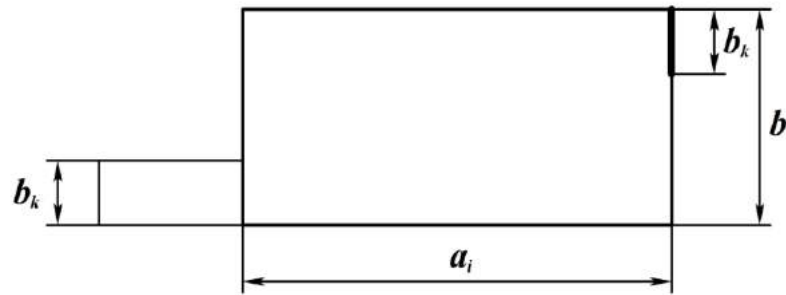


Рисунок 2.22 – Геометрическая модель пластины

Сопротивление определялось при различных соотношениях длины a_i и ширины b пластины $\beta = a/b$. При этом ширина в каждом случае была постоянной. Расчет сопротивления пластины проводился следующим образом: задавалась разность потенциалов контактов (10^{-3} В), определялся интеграл нормальной плотности тока по поверхности левого контакта (ток через контакт) и по закону Ома определялось сопротивление пластины с учетом левого контакта. Увеличенная длина левого контакта позволила более точно определить ток, протекающий по пластине. Это объясняется тем, что в COMSOL ток через контактную поверхность можно определить через нормальную плотность тока. В правой части пластины (см. рисунок 2.22) при определении тока через контакт, тангенциальная компонента тока существенно искажает результаты расчетов. При определении данной компоненты в программе на границе пластины получаются anomalously маленькие значения, которые далеки от действительности. Однако выяснено, что при длине левого контакта 20-25 мм, разница между вычисленными значениями тока, втекающего в пластину через левый контакт и вытекающего через правый, доходит до 8% [68]. Сопротивление левого контакта определено отдельно, его вычитание из полного сопротивления дает возможность узнать

сопротивление пластины при протекании по ней распределенного тока. Характер изменения сопротивления единичной пластины от соотношения ее длины и ширины был получен для четырех различных вариантов относительной ширины контакта приложения напряжения β_k (рисунок 2.23). В этих расчетах приняты следующие характеристики пластины: материал медь с удельной проводимостью $5,99 \cdot 10^7 \text{ См/м}$; толщина пластины $\Delta = 10^{-4} \text{ м}$; ширина пластины $b = 0,05 \text{ м}$; начальная длина $a_1 = 0,12 \text{ м}$.

Для каждой ширины контакта наблюдается некоторое минимальное значение сопротивления.

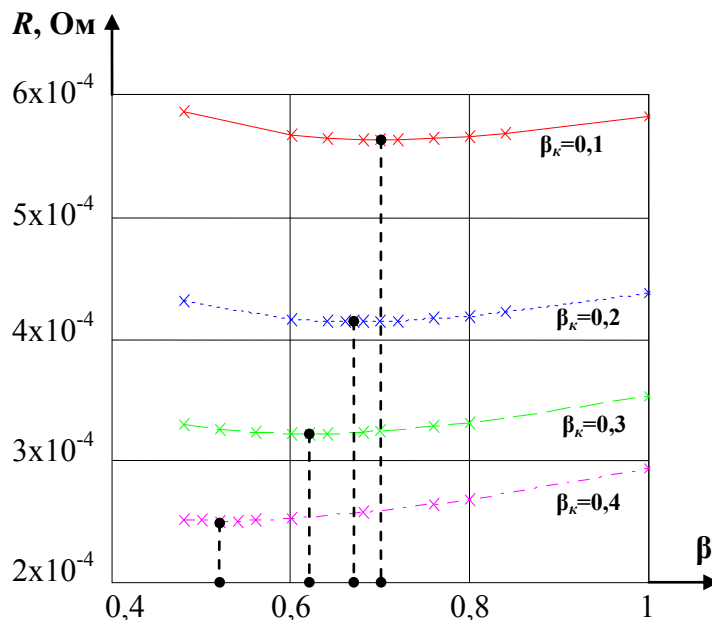


Рисунок 2.23 – Зависимость сопротивления единичной пластины от соотношения ее длины и ширины

2.6 Температурные исследования пакета пластин

Проведем исследование температурных характеристик пакетного элемента. С целью упрощения задачи принимаем плоскую геометрию пакета. Считаем также, что токовые линии отдельных пластин пакета не переходят из одного слоя в другой. При этом предположении изоляцией между пластинами пренебрегаем и в математической модели пакет представлен в виде сплошной структуры с однородными физическими характеристиками, к которым в первую очередь следует отнести теплопроводность. Данное предположение вполне допустимо,

если считать, что электрическая изоляция пластин реализована тонким слоем окисла металла, из которого выполнены эти пластины; при решении поставленной задачи предполагается использовать медь.

Аналитические исследования проводились с использованием модуля Heat Transfer – Joule Heating COMSOL Multiphysics. Предполагалось, что рассматриваемый пакет состоит из $N=100$ пластин толщиной $\Delta=0,1$ мм, длиной $a=100$ мм и шириной $b=50$ мм. По каждой пластине пропускался начальный ток величиной 50 А. В результате полный ток пакета составил 5000 А. С учетом того, что одним из возможных применений моментного двигателя является импульсный двигатель-маховик [26, 33, 48], время протекания тока по пакету задавалось не более 1 с. В процессе исследований рассматривались различные варианты установки в двигатель ленточной намотки и, соответственно, способы закрепления пакета (рисунок 2.24) [29, 65]. На указанных рисунках показаны температурные поля пакетов пластин после пропускания по ним тока в течение промежутка времени 1 с. Рассмотрены случаи, когда теплоотвод отсутствует (рисунок 2.24,а); пакет установлен на массивном теплоотводе (рисунок 2.24,б); пакет закреплен на теплоотводе Т-образного сечения, масса которого равна массе массивного теплоотвода (рисунок 2.24,в). В данном варианте пакет закреплен на тонкой пластине, которая является составляющей частью основного теплоотвода, представляющего собой фигуру Т-образного сечения. На рисунке 2.24,г представлена картина температурного поля пакета с дополнительными вырезами, необходимыми для формирования заданной функциональной зависимости силовой характеристики [27].

Анализируя температуру по окончании цикла протекания тока, следует отметить, что ее максимальное значение не превышает 80°C , что для условий эксплуатации упомянутого выше маховика не является серьезным препятствием. Таким же образом можно оценить и процесс нагрева при более длительном периоде протекания тока.

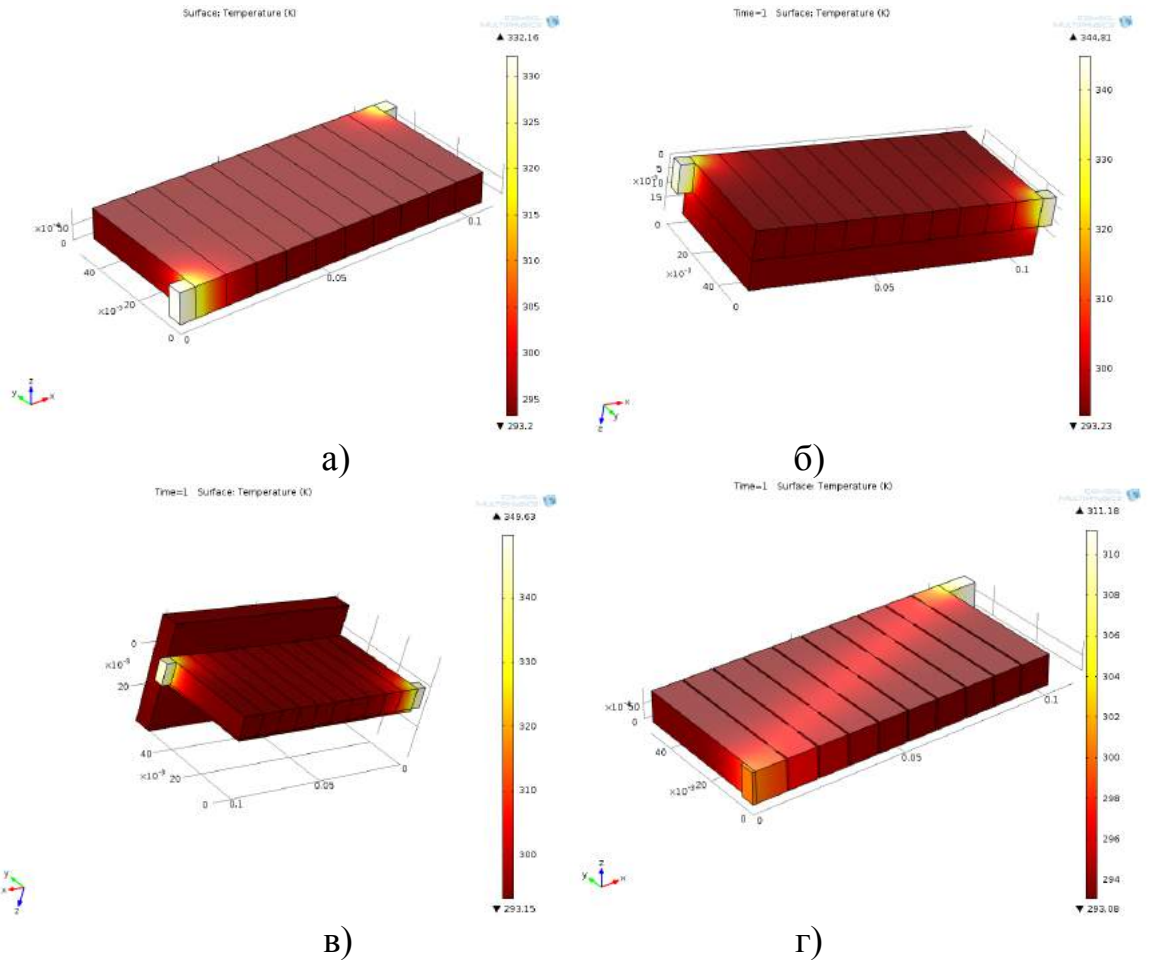


Рисунок 2.24 – Распределение температурного поля в пакете пластин:
 а) при отсутствии теплоотвода; б) при массивном теплоотводе; в) при теплоотводе Т-образного сечения; г) с дополнительными вырезами при отсутствии теплоотвода

В процессе протекания тока пластины нагреваются, меняются их омическое сопротивление, величина тока, в конечном итоге изменяется и сила, развиваемая между токами в пакете и источником магнитного потока [27]. С целью выяснения влияния нагрева на величину развиваемой силы был проведен расчет последней в исходном ("холодном") состоянии F_H и после цикла протекания тока F_K . На рисунке 2.25 показана закономерность изменения силы по длине пакета в исходном состоянии (рассматриваются пакеты без дополнительных вырезов).

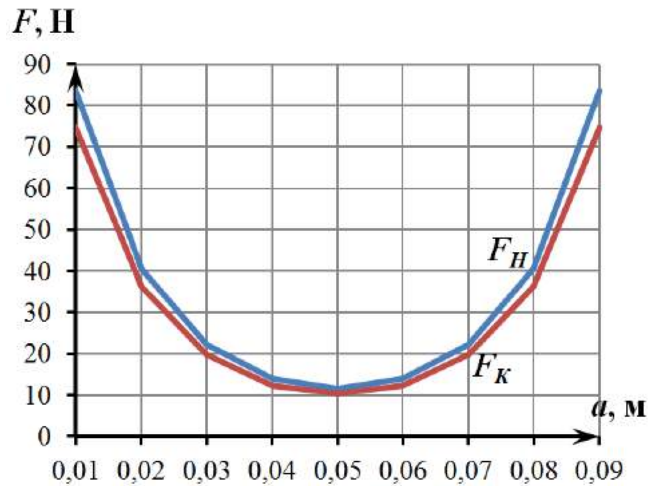


Рисунок 2.25 – Характер изменения силы по длине пакета в исходном состоянии и после нагрева

На рисунке 2.26 продемонстрированы зависимости относительных изменений силы f в конце цикла протекания тока. Параметр f определяется следующим образом:

$$f_i = \frac{F_{Hi} - F_{Ki}}{F_{Hi}},$$

где F_{Hi} , F_{Ki} – значения развиваемых сил в точке i по длине пакета в начале цикла протекания тока и при его окончании, соответственно. Параметр f_1 относится к пакету пластин без теплоотвода, f_2 – к пакету на массивном теплоотводе, f_3 – к пакету, который установлен на теплоотводе с Т-образным сечением.

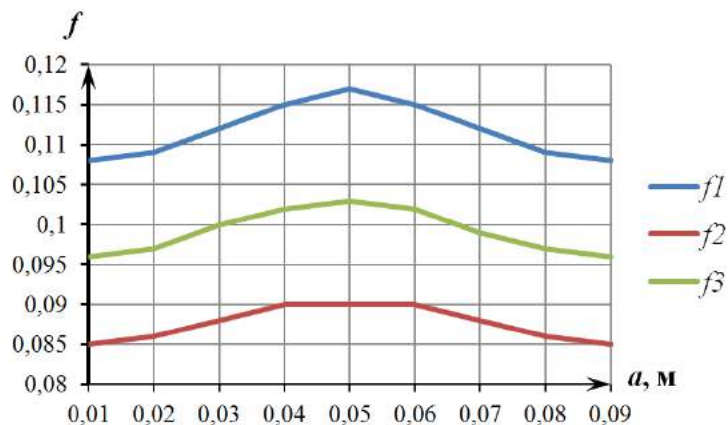


Рисунок 2.26 – Относительные изменения развиваемой силы в конце цикла протекания тока

Аналогичные исследования были проведены и для пакета с дополнительными боковыми вырезами. На рисунке 2.27 показаны зависимости

развиваемой силы в начале цикла протекания тока F_H и при его окончании F_K . Данные зависимости относятся к случаю исследования пакета без теплоотвода.

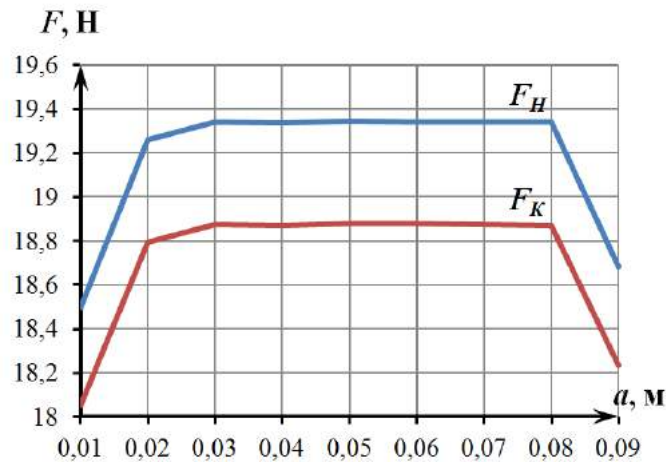


Рисунок 2.27 – Зависимости изменения развиваемой силы пакетом с дополнительными вырезами в начале и окончании цикла протекания тока

Графики относительного изменения силы при использовании теплоотводов приведены на рисунке 2.28. Обозначения для этих графиков аналогичны приведенным на рисунке 2.26.

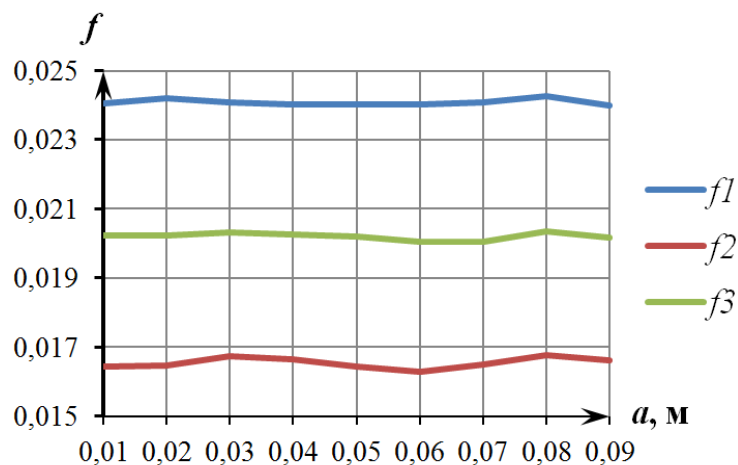


Рисунок 2.28 – Относительные изменения развиваемой силы в конце цикла протекания тока для пакета с дополнительными вырезами

Определенный интерес представляет закономерность распределения температуры по толщине пакета в наиболее его теплонапряженной зоне – в районе расположения контакта приложения напряжения. На рисунке 2.29 показаны точки, в которых рассчитывалась температура пакета после цикла протекания тока (1 с).

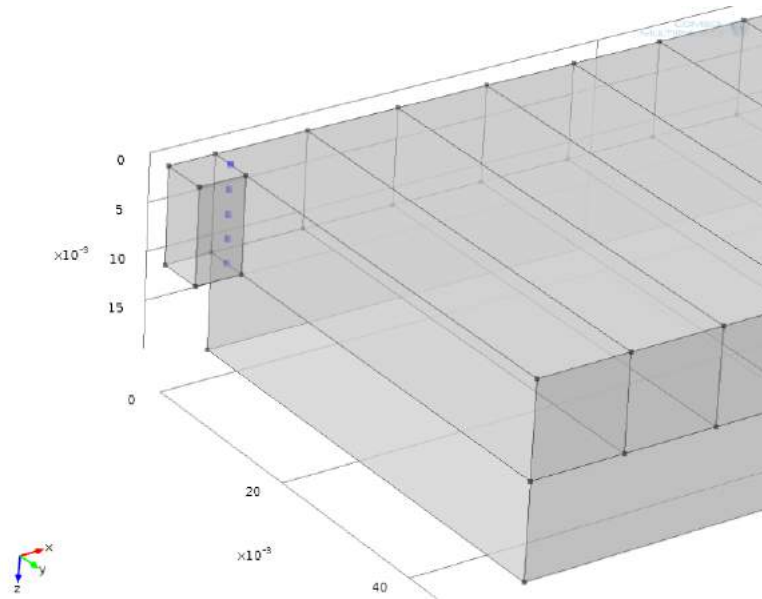


Рисунок 2.29 – Точки измерения температуры околоконтактного пространства пакета

Характер изменения температуры представлен графиками рисунка 2.30, которые представляют собой зависимости в случае применения массивного теплоотвода (кривая 1) и теплоотвода с Т-образным сечением (кривая 2). Указанные характеристики относятся к исследованию пакета без дополнительных вырезов. Координата Δ отсчитывается вдоль толщины пакета от плоскости соприкосновения с теплоотводом.

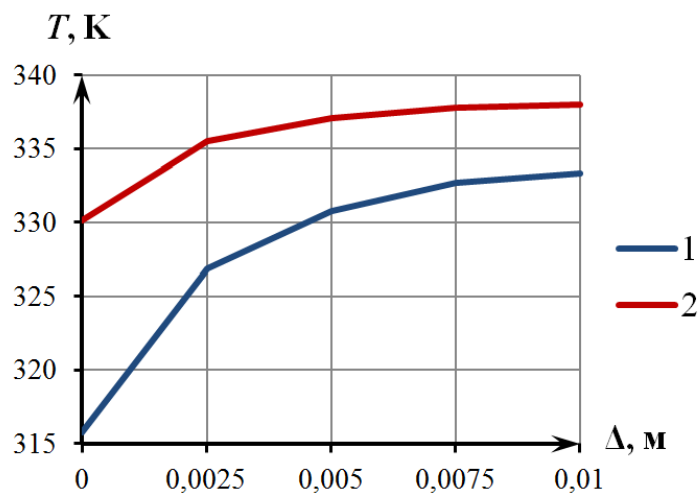


Рисунок 2.30 – Зависимость распределения температуры в околоконтактном пространстве пакета без дополнительных вырезов

Кривая 2 лежит выше кривой 1, что объясняется более сложным путем отвода выделяющегося тепла.

2.7 Магнитное поле пакета пластин

Несмотря на то, что во многих источниках [1, 13, 19, 47, 69, 70, 71] указывается практическое отсутствие влияния тока обмоток на магнитное поле, создаваемое высококоэрцитивными магнитами, для двигателя с ленточной намоткой это влияние может быть существенным [31, 53]. Показано, что в ряде случаев влияние магнитного потока, вызванного током в проводнике, может изменить ожидаемые расчетные эксплуатационные характеристики двигателя. Все объясняется тем, что одним из свойств намотки является способность пропускать достаточно большие токи, которые в свою очередь создают магнитные поля, искажающие основной поток в рабочем зазоре. Численные эксперименты, проведенные в модуле Magnetic Fields COMSOL Multiphysics, показывают, что в отсутствии внешнего источника магнитного поля при диагональном протекании распределенного тока через пакет пластин (на рисунке 2.31 токовые линии обозначены красным цветом) создается магнитное поле, характер распределения нормальных компонент индукции которого показан на рисунке 2.31 синими стрелками [86].

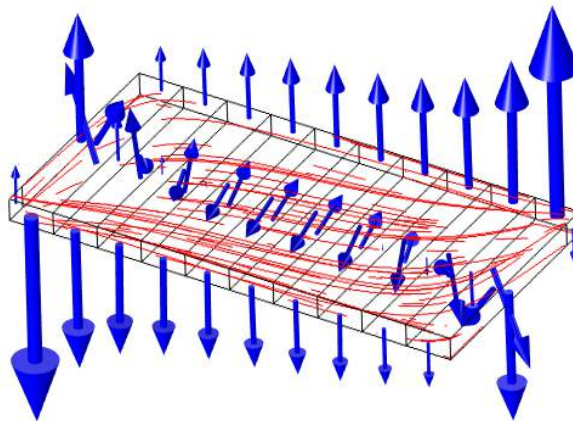


Рисунок 2.31 – Магнитное поле распределенного тока, протекающего через пакет пластин

В среде COMSOL получены графики распределения индукции (рисунок 2.32). Кривые 1 и 2 показывают распределение индукции по ширине пакета у его торцов, кривая 3 – по его центру. Таким образом, если пакет пластин с током поместить в магнитное поле цепи постоянных магнитов, то возможно искажение последнего.

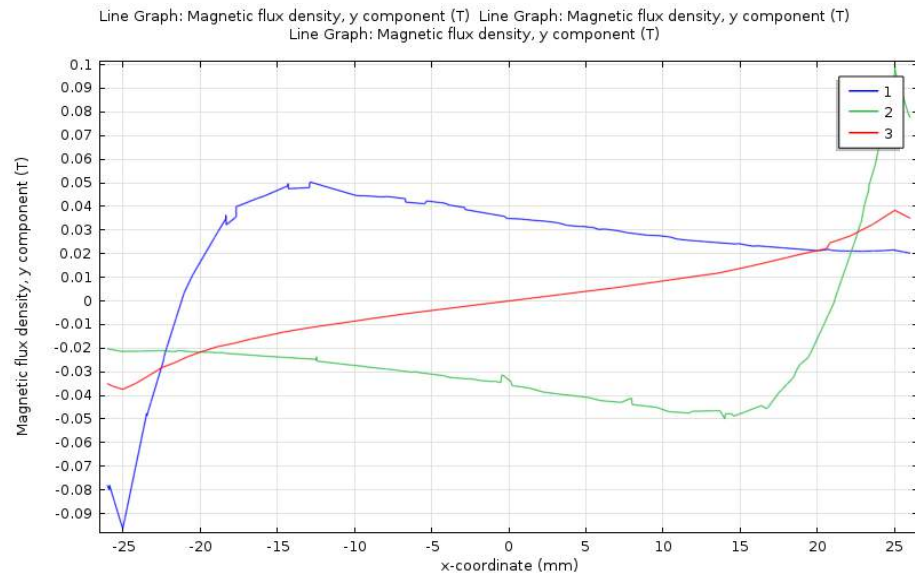


Рисунок 2.32 – Магнитное поле пакета пластин

Выводы к главе 2

1. Аналитически выведено выражение для развиваемой пластиной с током и магнитным полем силы, с учетом того, что через пластину протекает распределенный ток.
2. Предложена методика построения силовой характеристики пластины ленточной обмотки двигателя.
3. Показана возможность формирования необходимой силовой характеристики пластины ленточной обмотки двигателя путем выполнения дополнительных боковых вырезов в пластине.
4. Показано, что при определенном соотношении размеров пластины ленточной обмотки моментного двигателя будет наблюдаться минимальное значение ее сопротивления.
5. Показана возможность реализации предложенного варианта активного элемента на основе результатов численных исследований температурных полей пластины.

ГЛАВА 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОМЕНТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЛЕНТОЧНОЙ НАМОТКОЙ

3.1 Момент двигателя с ленточной намоткой

Согласно выражению (2.11) сила, создаваемая единичной пластиной с током, определяется следующим образом

$$F_1 = B(\delta) \cdot \Delta \cdot \frac{U}{2p \cdot R \cdot N} \cdot \frac{1}{I_0} \cdot D(x, y, I_0)_{x_c}, \quad (3.1)$$

где $B(\delta)$ – индукция магнитного поля; δ – длина немагнитного участка магнитной цепи; Δ – толщина ленты; U – напряжение источника питания постоянного тока; R – активное сопротивление единичной пластины; N – число витков (слоев) намотки; p – число пар полюсов магнитной системы; $D(x, y, I_0)_{x_c}$ – величина двойного интеграла по поверхности, представляющей зону действия магнитного потока. Интеграл вычисляется при нахождении центра постоянного магнита в точке x_c . I_0 – ток, при котором определяется величина двойного интеграла.

В многовитковой намотке выделим пакет единичных пластин, в котором практически идентичные пластины расположены одна над другой. Определим момент M_0 , который может быть создан упомянутой совокупностью пластин, находящихся под действием потока одного полюса магнитной системы

$$M_0 = \sum_{i=1}^N M_{0i},$$

где

$$\begin{aligned} M_{01} &= F_1 \cdot r_0; \\ M_{02} &= F_1 \cdot (r_0 + \Delta); \\ &\dots\dots\dots; \\ M_{0N} &= F_1 \cdot [r_0 + (N-1) \cdot \Delta]. \end{aligned}$$

В данном случае r_0 – средний радиус первого витка намотки.

Проведем суммирование моментов M_{0i} , учитывая, что

$$1 + 2 + 3 + \dots + (N-1) = \frac{(N-1)}{2} \cdot N \quad [18],$$

Получим

$$M_0 = N \cdot F_1 \cdot r_0 + F_1 \cdot \frac{\Delta}{2} \cdot (N-1) \cdot N = \\ \frac{\Delta}{2} \cdot N \cdot F_1 \cdot \left[N + \left(\frac{2r_0}{\Delta} - 1 \right) \right]$$

С учетом того, что магнитная система имеет $2p$ полюсов, момент, создаваемый двигателем равен

$$M = 2p \cdot M_0 = p \cdot \Delta \cdot N \cdot F_1 \cdot \left[N + \left(\frac{2r_0}{\Delta} - 1 \right) \right]. \quad (3.2)$$

Подставив в полученное выражение (3.2) величину силы единичной пластины (3.1), получаем выражение для момента двигателя с ленточной катушкой

$$M = \frac{\Delta^2}{2} \cdot \frac{U}{I_0 \cdot R} \cdot B(\delta) \cdot \left[N + \left(\frac{2r_0}{\Delta} - 1 \right) \right] \cdot D(x, y, I_0)_{x_c}. \quad (3.3)$$

В выражение (3.3) не входит число пар полюсов p , которое несмотря на это будет проявляться в величине двойного интеграла $D(x, y, I_0)_{x_c}$, сопротивления единичной пластины R , а также магнитной индукции в воздушном зазоре. Данные положения будут доказаны ниже.

3.2 Оценка влияния параметров катушки на величину момента

3.2.1 Выбор числа витков катушки

Рассматривая выражение для момента (3.3), большее число витков N , с одной стороны, должно увеличить момент за счет большего количества активных элементов. Однако во столько же раз увеличивается и сопротивление катушки, и, следовательно, уменьшается ток. Получается так, что число витков катушки на величину момента практически не влияет. Увеличение среднего радиуса катушки

$r_{cp} = \frac{\Delta}{2} \left[N + \left(\frac{2r_0}{\Delta} - 1 \right) \right]$ момент увеличивает незначительно.

Аналитические исследования показывают, что закон изменения момента определяется в основном характером изменения индукции в зазоре.

Так как индукция уменьшается с ростом числа витков N , вызывающем увеличение воздушного зазора, то N должно быть как можно меньше; однако при этом может возрасти ток. Выбранный ток должен быть допустимым, зависящим от возможностей источника питания и теплостойкости материала ленты [85].

$$\frac{U}{R \cdot N \cdot 2p} \leq I_{\text{дон}}, \quad N \geq \frac{U}{2p \cdot R \cdot I_{\text{дон}}}.$$

3.2.2 Зависимость момента от числа пар полюсов. Относительный момент

Рассмотрим влияние числа пар полюсов на величину момента. Как указано выше, число пар полюсов непосредственно не входит в выражение для момента (3.3), но его влияние проявится в величине двойного интеграла $D(x, y, I_0)_{x_c}$, сопротивления единичной пластины R и индукции в воздушном зазоре. Предполагаем, что величины Δ , U , I_0 , N , r_0 в выражении (3.3) являются постоянными. При этих условиях из (3.3) получаем

$$M = k \cdot \frac{D(x, y, I_0)_{x_c}}{R} \cdot B(\delta), \quad (3.4)$$

$$\text{где } k = \frac{\Delta^2}{2} \cdot \frac{U}{I_0} \cdot \left[N + \left(\frac{2r_0}{\Delta} - 1 \right) \right].$$

Характер изменения момента от перечисленных выше переменных величин, будем оценивать величиной относительного момента

$$k_M = \frac{M_i}{M_1}, \quad (3.5)$$

где M_1 – момент в случае одной пары полюсов ($p=1$); M_i – момент при $p=i$ пар полюсов.

Распишем выражение для относительного момента (3.5), учитывая (3.4)

$$k_M = \frac{M_i}{M_1} = \frac{k}{k} \cdot \frac{B_i}{B_1} \cdot \frac{R_1}{R_i} \cdot \frac{D_i(x, y, I_0, x_c)}{D_1(x, y, I_0, x_c)} = \left(\frac{B_i}{B_1} \right) \cdot \left(\frac{R_1}{R_i} \right) \cdot \left[\frac{D_i(x, y, I_0, x_c)}{D_1(x, y, I_0, x_c)} \right]. \quad (3.6)$$

Для оценки величин относительного момента необходимо определить значения сомножителей, входящих в выражение (3.6) для различного числа пар полюсов.

Относительная величина момента k_M в дальнейшем позволит определить соответствующие характеристики двигателя при различном числе пар полюсов. Используя характеристики двигателя, рассчитанные для одной пары полюсов, k_M покажет наглядную тенденцию изменения момента.

3.2.3 Определение относительной индукции варианта магнитной цепи моментного двигателя

Для определения зависимости индукции от числа пар полюсов $B(p)$ в системе T-flex CAD была построена упрощенная параметрическая модель магнитной системы двигателя с возможностью изменения числа пар полюсов и величины воздушного зазора.

Зададимся условием, что основные размеры магнитной системы остаются неизменными. К их числу относятся осевая длина b , наружный D_1 и внутренний D_2 диаметры внешней магнитной цепи, d_1 и d_2 – диаметры соответственно внутренней магнитной цепи; толщины магнитов $(D_1 - D_2)/2$ и $(d_1 - d_2)/2$ (рисунок 3.1). Также принята неизменной длина рабочего воздушного зазора δ .

Для различного числа пар полюсов полюсное деление $\tau = \pi/p$. Длина полюса определяется через величину полюсного перекрытия α_δ как $\alpha_\delta \cdot \tau$; соответственно угловой размер постоянного магнита $(1 - \alpha_\delta) \cdot \tau$. На рисунке 3.1 отображена магнитная система с $p=2$.

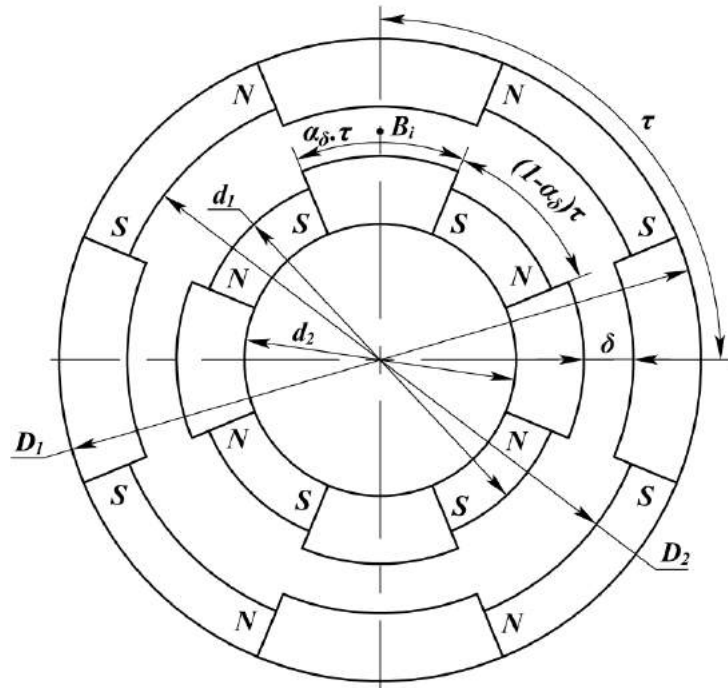


Рисунок 3.1 – Исследуемая магнитная система

Численные исследования были проведены для двух типоразмеров магнитной системы двигателя:

1. $D_1=0,12м$; $D_2=0,1м$; $d_1=0,072м$; $d_2=0,052м$; $\delta=0,01м$; $b=0,05м$, $l_{ср} = 0,27м$.
2. $D_1=0,065м$; $D_2=0,055м$; $d_1=0,0375м$; $d_2=0,0275м$; $\delta=0,005м$; $b=0,025м$, $l_{ср} = 0,145м$.

В обоих случаях было задано одно и то же значение полюсного перекрытия $\alpha_\delta = 0,5$.

Для численного моделирования, построенная модель магнитной системы была импортирована в COMSOL Multiphysics (рисунок 3.2). При заданных условиях в качестве материала постоянных магнитов выбран сплав с остаточной индукцией $B_r = 1,22$ Тл и $\mu_r = 1,05$; материал полюсов – "soft iron (without losses)" (как заложено в библиотеке материалов COMSOL). Определение индукции магнитного потока B_i в рабочем воздушном зазоре проводилось под центром полюсов (см. рисунок 3.1) [10].

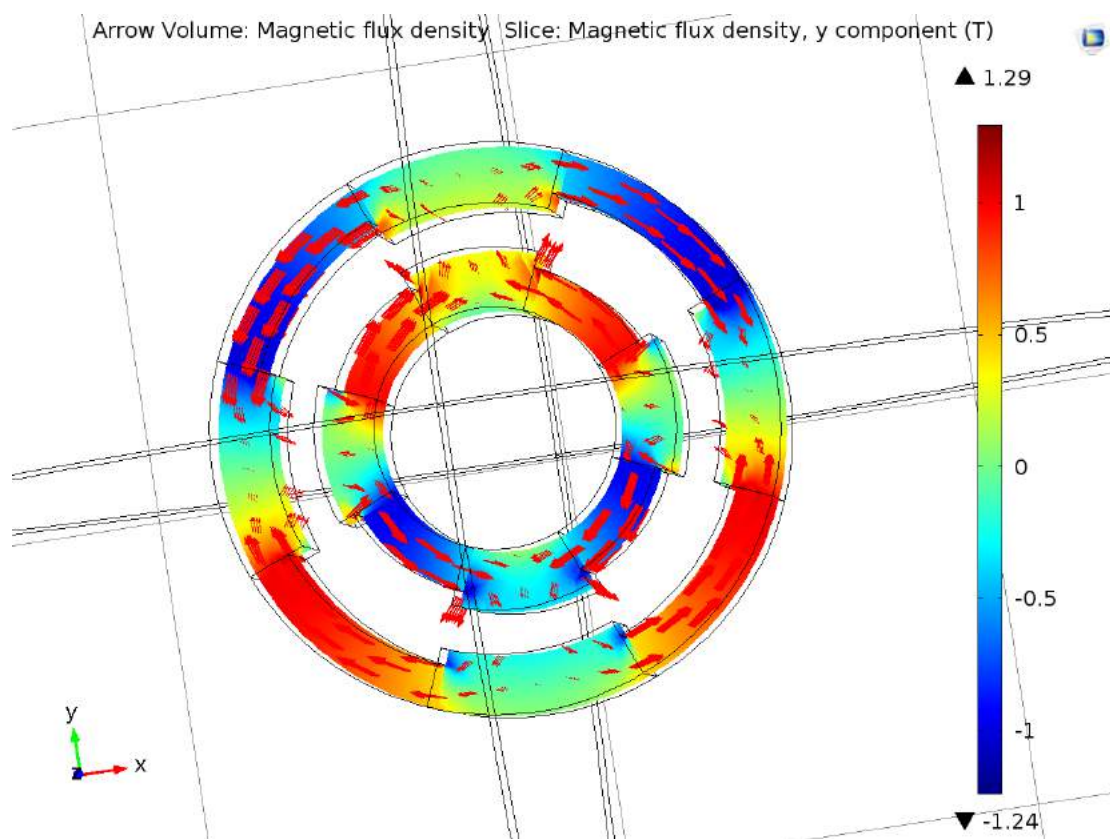


Рисунок 3.2 – Модель магнитной системы в окне COMSOL

Расчетные значения индукции в воздушном зазоре в функции от числа пар полюсов магнитной системы первого типоразмера приведены в таблице 3.1 и на графике рисунка 3.3. Отметим, что наибольшее значение индукции в рабочем воздушном зазоре в данном случае наблюдается при числе пар полюсов $p=5$. В таблице 3.1 также приведены относительные значения индукция B_i/B_1 .

Таблица 3.1 – Индукция от числа пар полюсов для первого типоразмера

p	1	2	3	4	5	6	8	10	12
B_i	0,187	0,298	0,360	0,388	0,402	0,391	0,366	0,303	0,252
B_i/B_1	1,000	1,594	1,925	2,075	2,150	2,091	1,957	1,620	1,348

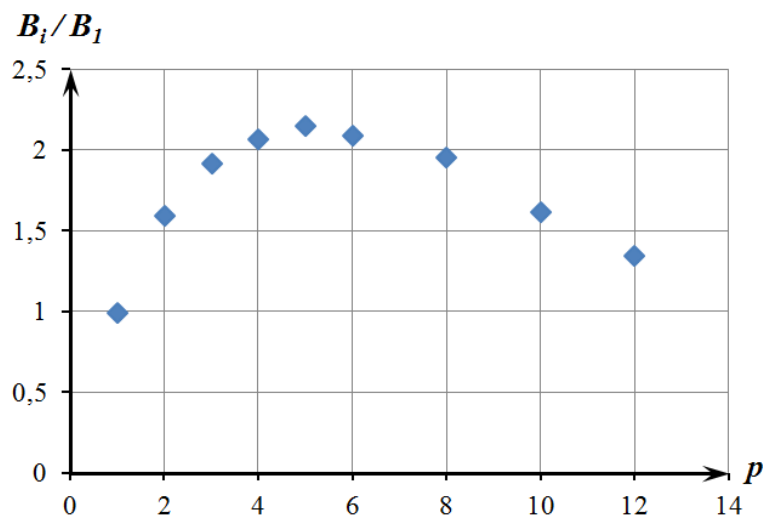


Рисунок 3.3 – График зависимости относительной индукции от числа пар полюсов для первого типоразмера

Для второго типоразмера при рассмотрении зависимости индукции магнитного потока в воздушном зазоре от числа пар полюсов, диапазон величин воздушного зазора было решено расширить. Полученные результаты для $\delta=0,003$ м, $\delta=0,005$ м, $\delta=0,007$ м приведены в таблице 3.2 и на графиках рисунка 3.4. При увеличении воздушного зазора максимальное значение индукции наблюдается при меньшем числе пар полюсов. Для дальнейших исследований выбрано среднее значение воздушного зазора, а именно $\delta=5$.

Таблица 3.2 – Индукция от числа пар полюсов для второго типоразмера

p	$\delta=0,003$ м		$\delta=0,005$ м		$\delta=0,007$ м	
	B_i , Тл	B_i/B_1	B_i , Тл	B_i/B_1	B_i , Тл	B_i/B_1
1	0,235	1,000	0,205	1,000	0,185	1,000
2	0,394	1,678	0,325	1,585	0,284	1,530
3	0,423	2,100	0,391	1,907	0,331	1,785
4	0,548	2,336	0,419	2,044	0,344	1,855
5	0,566	2,409	0,425	2,073	0,335	1,808
6	0,570	2,430	0,404	1,971	0,324	1,746
8	0,540	2,300	0,368	1,795	0,269	1,449
10	0,510	2,173	0,320	1,561	0,219	1,184
12	0,457	1,948	0,297	1,449	0,181	0,974

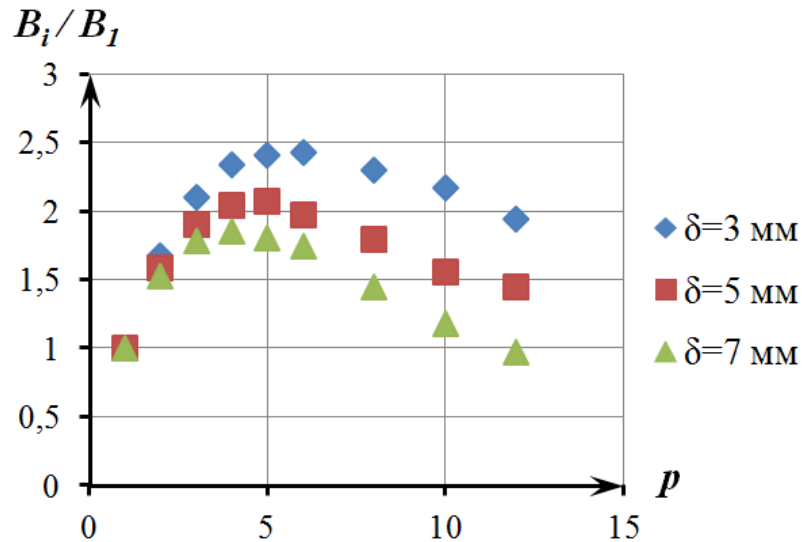


Рисунок 3.4 – График зависимости относительной индукции от числа пар полюсов для второго типоразмера

Необходимо отметить, что полученные данные для индукции не являются определяющими при рассмотрении ее влияния на момент двигателя, поскольку конструкция магнитной цепи является довольно упрощенной, а значения индукции выбраны исходя из условия, что магнитное поле под полюсом является однородным [25].

3.2.4 Относительные сопротивление и двойной интеграл

Проведем оценку величины сопротивления единичной пластины ленточной катушки при изменении числа пар полюсов. Считаем, что ширина ленты b соответствует осевой длине магнитной системы двигателя, а длина единичной пластины, из совокупности которых состоит катушка, равна $a_i = l_{вср}/2p$, где $l_{вср}$ – длина среднего витка ленточной катушки, помещаемой в воздушный рабочий зазор магнитной системы (рисунок 3.5). Сопротивления пластин также будем оценивать относительными величинами R_i/R_1 , где R_1 – сопротивление пластины длиной $a_1 = l_{вср}/2$.

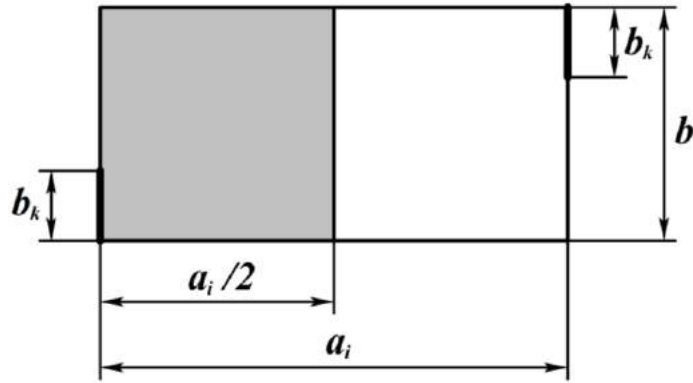


Рисунок 3.5 – Геометрическая модель пластины

В главе 2 настоящей работы было отмечено, что значительное влияние на величину развиваемого усилия (момента) оказывает размер контакта приложения напряжения b_k , эти контакты находятся в диагонально расположенных углах пластины (рисунок 3.5).

Оценка величин сопротивления и двойного интеграла проводилась с помощью модуля Electric Currents COMSOL Multiphysics. В этом случае одновременно можно получить данные для расчета искомых величин. Геометрическое построение пластины в окне COMSOL проводилось согласно рисунку 3.5. Заштрихованное пространство пластины представляет собой область, перекрываемую магнитом и, соответственно, область, по которой проводится двойное интегрирование. Эта область определяется выбранным значением полюсного перекрытия двигателя $\alpha_s = 0,5$. Во всех случаях, с целью получения однозначности результатов, область интегрирования длиной $a_i/2$ выбирается прилегающей к одному краю пластины (на рисунке 3.5 – к левому).

Сопротивление пластины определялось по методике, изложенной в п. 2.2 настоящей работы. Результаты расчетов сопротивлений пластин разной длины ($a_i = a_1/p$) для первого типоразмера приведены в таблице 3.3. В этих расчетах приняты следующие характеристики пластин: материал – медь с удельной проводимостью $5,99 \cdot 10^7$ См/м; толщина пластины $\Delta = 10^{-4}$ м; ширина пластины $b = 0,05$ м; начальная длина $a_1 = 0,135$ м. В таблице 3.3 приведены данные для случая, когда относительная ширина контакта $\beta_k = 0,1$. Характер изменения

сопротивления пластины при вариации числа пар полюсов от $p=1$ до $p=12$ приведен на рисунке 3.6.

Таблица 3.3 – Сопротивления пластины от числа пар полюсов для первого типоразмера

p	1	2	3	4	5	6	8	10	12
$R_i \cdot 10^{-4}, \text{ Ом}$	8,09	6,18	5,76	5,77	5,97	6,25	7,00	7,87	8,82

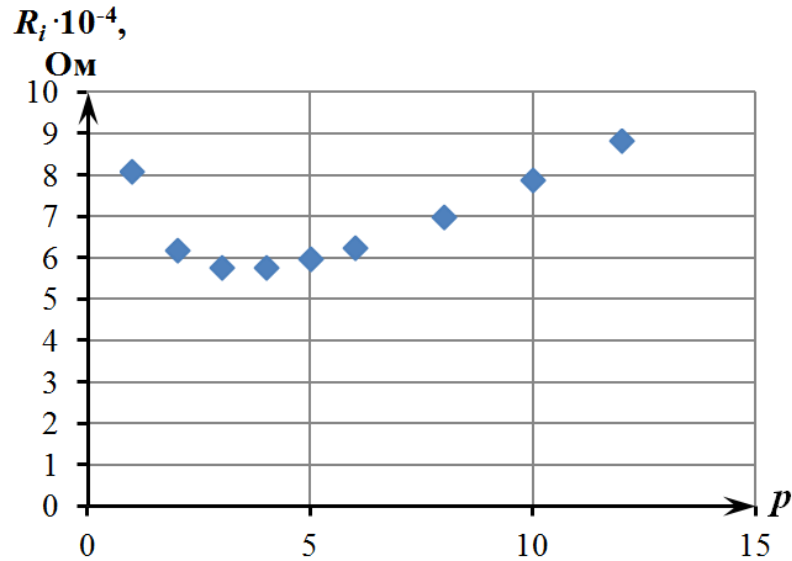


Рисунок 3.6 – Характер изменения сопротивления пластины от числа пар полюсов для первого типоразмера

В таблице 3.4 и кривыми на рисунке 3.7 показаны результаты определения относительных сопротивлений R_i/R_1 при различных величинах относительной ширины контакта $\beta_k = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$. Анализ приведенных результатов расчетов показывает, что наименьшее сопротивление пластины наблюдается, когда число пар полюсов $p=3$ и $p=4$. Полученные результаты соответствуют положениям, описанным в главе 2, которые говорят о том, что при определенном сочетании геометрических параметров пластины, наблюдается минимальное значение сопротивления.

Таблица 3.4 – Изменение относительных сопротивлений от числа пар полюсов для первого типоразмера

$p \backslash \beta_k$	0,1	0,2	0,3	0,4
1	1	1	1	1
2	0,764	0,711	0,667	0,628
3	0,712	0,644	0,576	0,526
4	0,713	0,640	0,571	0,499
5	0,738	0,664	0,587	0,502
6	0,773	0,702	0,619	0,52
8	0,865	0,799	0,704	0,578
10	0,973	0,913	0,805	0,649
12	1,09	1,04	0,912	0,725

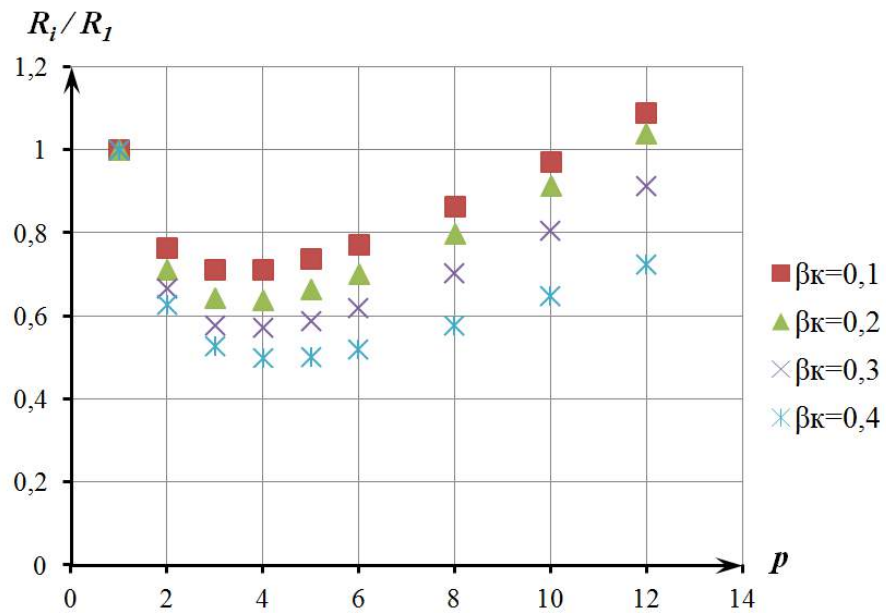


Рисунок 3.7 – Характер изменения относительных сопротивлений от числа пар полюсов для первого типоразмера

В таблице 3.5 и кривыми на рисунке 3.8 показаны результаты определения относительных сопротивлений R_i/R_1 при различных величинах относительной ширины контакта $\beta_k = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ для второго типоразмера.

Таблица 3.5 – Изменение относительных сопротивлений R_i/R_1 от числа пар полюсов для второго типоразмера

$p \backslash \beta_k$	0,1	0,2	0,3	0,4
1	1	1	1	1
2	0,731	0,676	0,636	0,6
3	0,657	0,587	0,53	0,48
4	0,639	0,561	0,495	0,433
5	0,645	0,564	0,49	0,418
6	0,665	0,583	0,502	0,418
8	0,717	0,636	0,543	0,438
10	0,797	0,717	0,61	0,478
12	0,88	0,7996	0,68	0,521

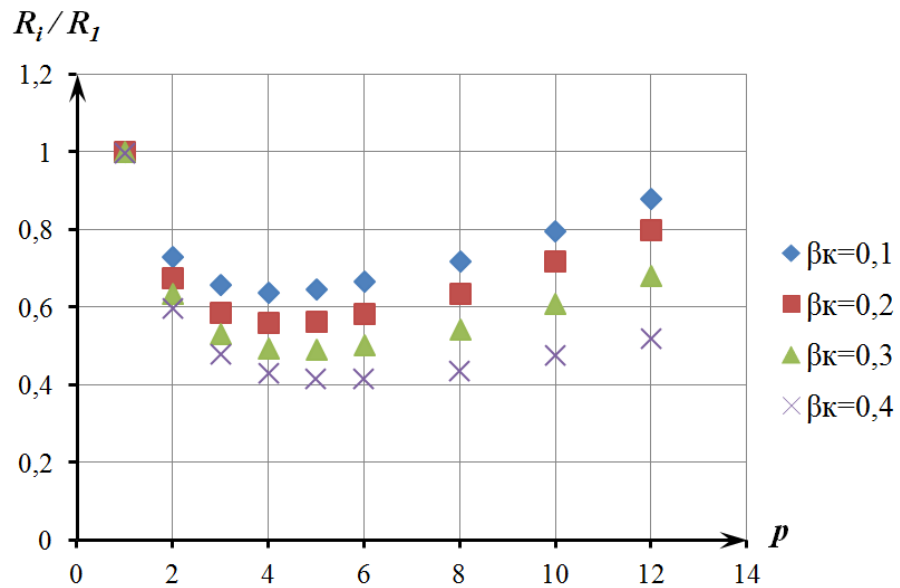


Рисунок 3.8 – Характер изменения относительных сопротивлений от числа пар полюсов для второго типоразмера

Для оценки характера изменения момента от числа пар полюсов согласно (3.6) необходимо иметь зависимости R_1/R_i , которые являются обратными к только что полученным на рисунках 3.7 и 3.8. На рисунках 3.9 и 3.10 приведены зависимости R_1/R_i для первого и второго типоразмеров соответственно.

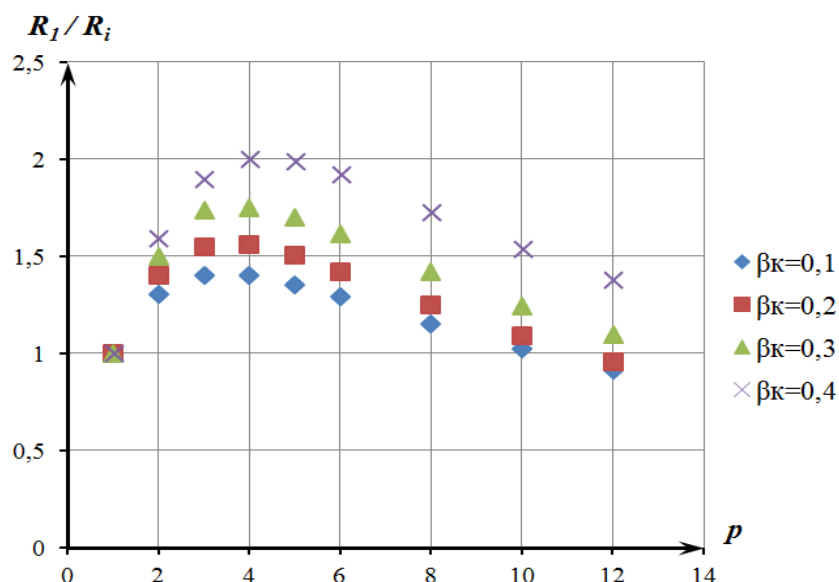


Рисунок 3.9. – Характер изменения обратных относительных сопротивлений от числа пар полюсов для первого типоразмера

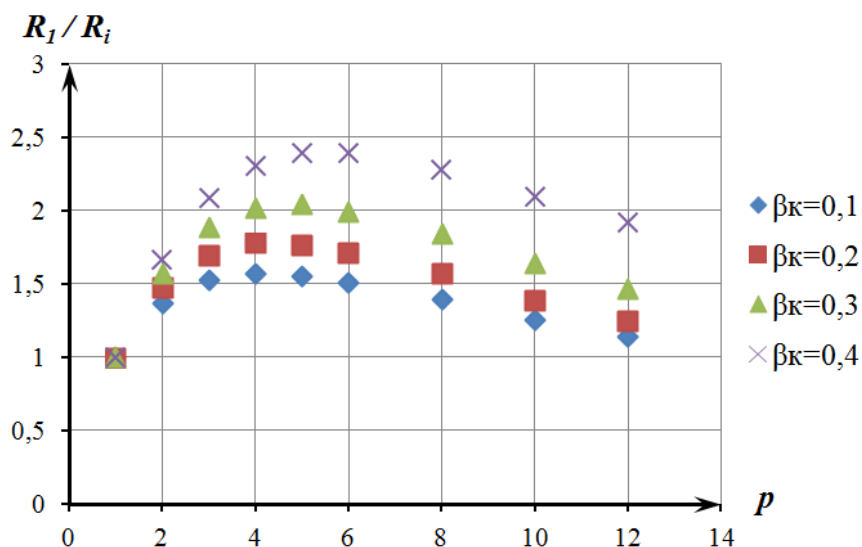


Рисунок 3.10 – Характер изменения обратных относительных сопротивлений от числа пар полюсов для второго типоразмера

Полученные результаты подтверждают положение, что сопротивление пластины зависит от геометрических параметров последней. При определенном соотношении длины и ширины пластины, которое проявляется при изменении числа пар полюсов, наблюдается минимальное значение сопротивления пластины. При этом обратные относительные сопротивления, которые являются сомножителем в выражении для относительного момента (3.6), будут иметь максимум при некотором числе пар полюсов.

Проведенный одновременно с определением сопротивления пластины R_i численный эксперимент по оценке величины двойного интеграла $D_i(x, y, I_0)_{x_c}$, входящего в выражение для момента (3.3), показывает, что этот интеграл остается практически неизменным для пластин разной длины и для заданных ранее условий; в частности, для первого типоразмера он получился равным $D_i(x, y, I_0)_{x_c} \approx 222$ А. Величина этого интеграла приведена к току через пластину $I_0 = 1$ А.

Для второго типоразмера получены значения относительной величины двойного интеграла при различном числе пар полюсов и относительной величине контакта (таблица 3.6, рисунок 3.11). Полученные данные также приведены к току через пластину $I_0 = 1$ А.

Таблица 3.6 – Изменение относительной величины двойного интеграла от числа пар полюсов для второго типоразмера

$p \backslash \beta_k$	0,1	0,2	0,3	0,4
1	1	1	1	1
2	1	0,998	0,995	0,99
3	0,999	0,995	0,986	0,974
4	0,998	0,991	0,978	0,955
5	0,998	0,989	0,969	0,936
6	0,997	0,986	0,96	0,908
8	0,996	0,98	0,943	0,878
10	0,994	0,974	0,925	0,837
12	0,994	0,967	0,909	0,803

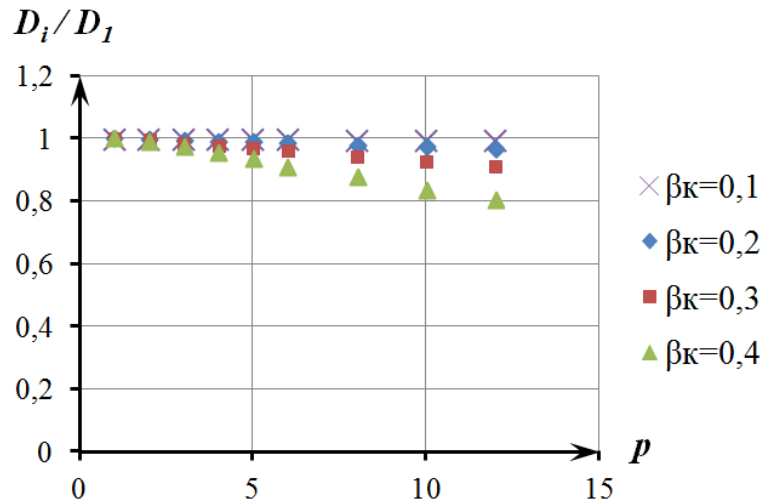


Рисунок 3.11 – Характер изменения относительной величины двойного интеграла от числа пар полюсов для второго типоразмера

Полученные результаты показывают, что при малой ширине контакта относительная величина двойного интеграла практически не меняется. Существенные изменения будут наблюдаться только при значительном увеличении ширины контакта.

3.2.5 Зависимость относительного момента от числа пар полюсов

Для анализа характеристик предложенного варианта моментного двигателя были проведены расчеты его основных параметров, а именно развиваемого момента, потребляемой мощности и добротности. Расчеты были проведены для двигателя с одной парой полюсов при $\beta_k=0,2$ для каждого типоразмера. В обоих случаях напряжение питания было выбрано с целью обеспечения протекающего через контакты катушки тока равного 100 А при заданном числе витков. При расчете были использованы следующие числовые значения для двух типоразмеров двигателей:

$$1. \Delta = 10^{-4} \text{ м}, U = 12,2 \text{ В}, I_0 = 1 \text{ А}, R = 8,09 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, N = 75, r_0 = 0,04385 \text{ м}, \\ D(x, y, I_0)_{x_c} = 222 \text{ А}, B(\delta) = 0,187 \text{ Тл}, m = 3,158 \text{ кг}.$$

$$2. \Delta = 10^{-4} \text{ м}, U = 3,7 \text{ В}, I_0 = 1 \text{ А}, R = 7,385 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, N = 25, r_0 = 0,024 \text{ м}, \\ D(x, y, I_0)_{x_c} = 97 \text{ А}, B(\delta) = 0,205 \text{ Тл}, m = 0,4 \text{ кг}.$$

В результате расчета для первого типоразмера получили развиваемый момент $M_{I1} = 3$ Н·м; потребляемая мощность $P_{I1} = 1227$ Вт; добротность

$$Q_{I1} = 0,03 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \sqrt{\text{Вт}}} .$$

Для второго типоразмера получили развиваемый момент $M_{II1} = 0,25$ Н·м; потребляемая мощность $P_{II1} = 371$ Вт; добротность $Q_{II1} = 0,03 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \sqrt{\text{Вт}}} .$

Приведенные ниже результаты анализа в виде графиков в относительных единицах с помощью полученных расчетных значений основных характеристик двигателя при одной паре полюсов магнитной системы позволят оценить данные характеристики при других значениях числа пар полюсов и относительной ширины контакта.

Определим характер изменения относительного момента от числа пар полюсов, пользуясь выражением (3.6) и результатами таблиц 3.1, 3.2, 3.4-3.6. Расчетные данные для первого типоразмера приведены в таблице 3.7 и на рисунке 3.12, для второго типоразмера – в таблице 3.8, рисунке 3.13. Относительный максимальный момент в этом случае наблюдается при $p=4$ и $p=5$.

Таблица 3.7 – Изменение относительного момента от числа пар полюсов для первого типоразмера

$p \backslash \beta_k$	0,1	0,2	0,3	0,4
1	1	1	1	1
2	2,088	2,243	2,391	2,539
3	2,703	2,989	3,342	3,659
4	2,911	3,243	3,633	4,148
5	2,920	3,245	3,672	4,293
6	2,711	2,985	3,386	4,029
8	2,262	2,450	2,779	3,386
10	1,665	1,774	2,012	2,496
12	1,236	1,297	1,477	1,859

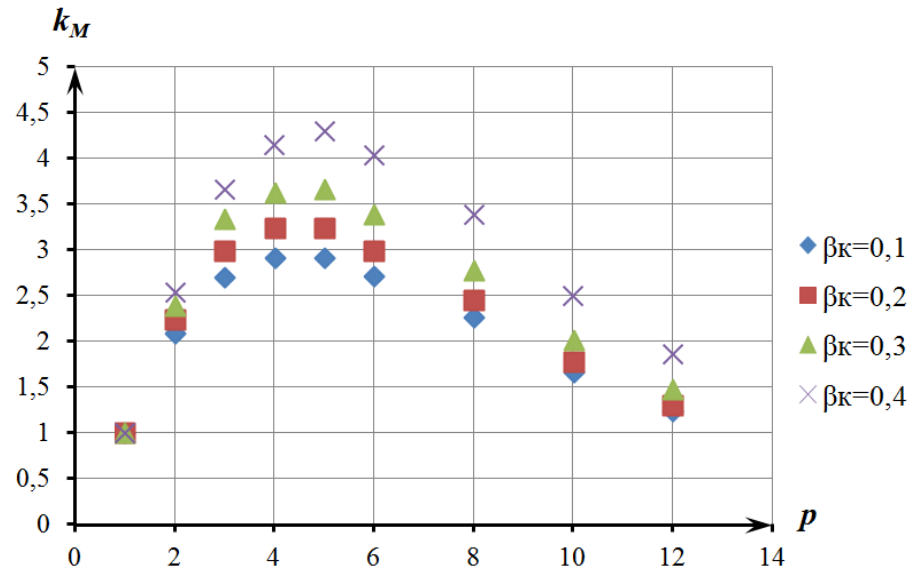


Рисунок 3.12 – Характер изменения относительного момента от числа пар полюсов для первого типоразмера

Таблица 3.8 – Изменение относительного момента от числа пар полюсов для второго типоразмера

$p \backslash \beta_k$	0,1	0,2	0,3	0,4
1	1	1	1	1
2	2,168	2,338	2,479	2,611
3	2,900	3,233	3,550	3,865
4	3,192	3,609	4,042	4,513
5	3,209	3,635	4,098	4,641
6	2,954	3,333	3,767	4,283
8	2,492	2,767	3,114	3,595
10	1,947	2,121	2,365	2,732
12	1,638	1,753	1,936	2,234

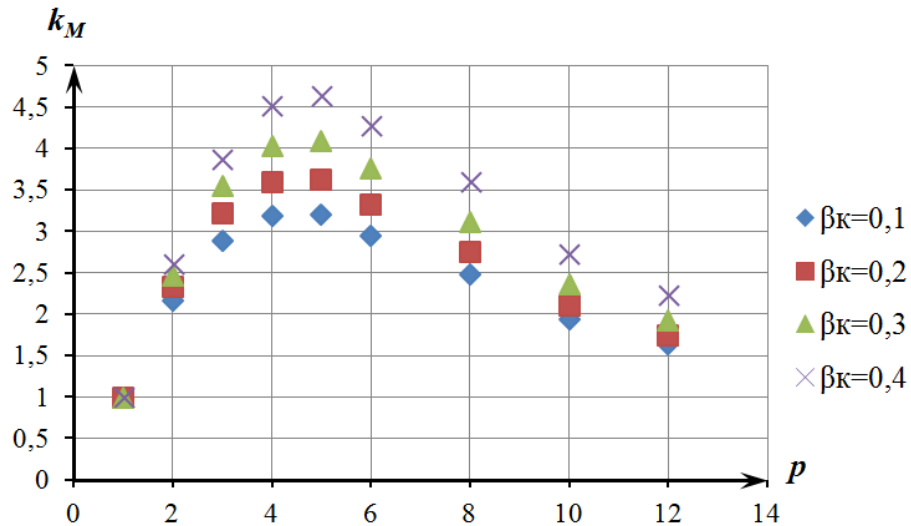


Рисунок 3.13 – Характер изменения относительного момента от числа пар полюсов для второго типоразмера

Относительный максимальный момент во втором случае наблюдается при числе пар полюсов $p=5$.

3.3 Относительная мощность потребления

Если считать, что мощность, потребляемая двигателем из сети определяется как

$$P = \frac{U^2}{2p \cdot R \cdot N},$$

то относительная потребляемая мощность будет иметь вид

$$k_p = \frac{P_i}{P_1} = \frac{R_1}{p \cdot R_i} = \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{R_1}{R_i} \right); \quad (3.7)$$

где $i = p$.

Результаты расчетов для первого типоразмера приведены в таблице 3.9 и в виде семейства кривых на рисунке 3.14; для второго типоразмера – в таблице 3.10 и на рисунке 3.15.

Таблица 3.9 – Относительная мощность потребления от числа пар полюсов для первого типоразмера

$p \backslash \beta_k$	0,1	0,2	0,3	0,4
1	1	1	1	1
2	0,654	0,703	0,75	0,796
3	0,468	0,518	0,579	0,634
4	0,351	0,391	0,438	0,501
5	0,271	0,301	0,341	0,398
6	0,216	0,237	0,269	0,321
8	0,144	0,156	0,178	0,216
10	0,103	0,109	0,124	0,154
12	0,076	0,08	0,091	0,115

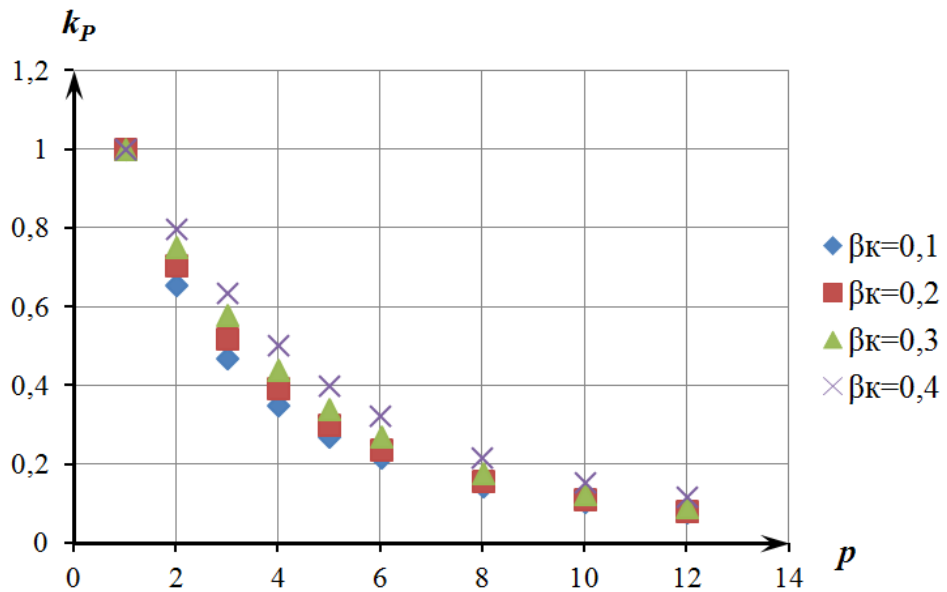


Рисунок 3.14 – Характер изменения относительной мощности потребления от числа пар полюсов для первого типоразмера

Таблица 3.10 – Относительная мощность потребления от числа пар полюсов для второго типоразмера

$p \backslash \beta_k$	0,1	0,2	0,3	0,4
1	1	1	1	1
2	0,684	0,739	0,786	0,832
3	0,507	0,568	0,629	0,694
4	0,391	0,446	0,506	0,578
5	0,310	0,355	0,408	0,478
6	0,251	0,286	0,332	0,399
8	0,174	0,197	0,230	0,285
10	0,126	0,140	0,164	0,209
12	0,095	0,104	0,123	0,160

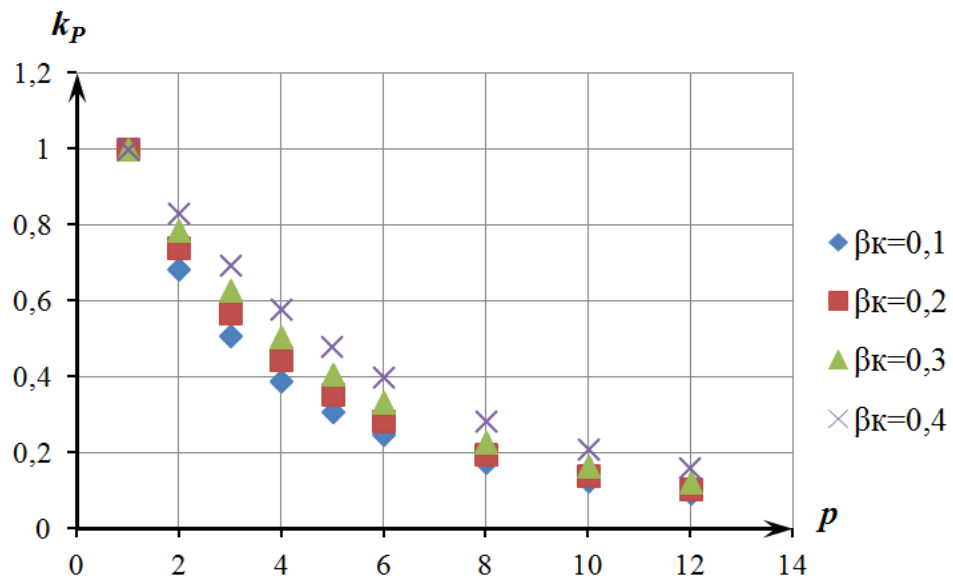


Рисунок 3.15 – Характер изменения относительной мощности потребления от числа пар полюсов для второго типоразмера

Анализ полученных результатов говорит о том, что относительная потребляемая мощность плавно уменьшается по мере роста числа пар полюсов. Это объясняется тем, что характер изменения относительной потребляемой мощности k_p в основном определяется обратной зависимостью числа пар полюсов, которая входит в выражение (3.7) и имеет гиперболический вид.

3.4 Относительная статическая добротность

Далее рассмотрим характер изменения статической добротности двигателя

$$Q = \frac{M}{m \cdot \sqrt{P}} \quad [19].$$

Также проведем оценку относительной статической добротности k_Q , при этом считаем, что масса двигателя при разном числе пар полюсов p остается практически неизменной. Поэтому получаем относительную статическую добротность

$$k_Q = \frac{Q_i}{Q_1} = \frac{M_i}{m \cdot \sqrt{P_i}} \cdot \frac{m \cdot \sqrt{P_1}}{M_1} = \frac{M_i}{M_1} \cdot \sqrt{\frac{P_1}{P_i}} = \frac{k_M}{\sqrt{k_P}}.$$

Результаты оценки для первого типоразмера приведены в таблице 3.11 и на графиках рисунка 3.16; для второго типоразмера – в таблице 3.12 и на рисунке 3.17.

Таблица 3.11 – Относительная статическая добротность от числа пар полюсов для первого типоразмера

$p \backslash \beta_k$	0,1	0,2	0,3	0,4
1	1	1	1	1
2	2,582	2,675	2,761	2,846
3	3,951	4,153	4,392	4,595
4	4,914	5,186	5,489	5,860
5	5,609	5,915	6,288	6,805
6	5,833	6,132	6,529	7,111
8	5,961	6,203	6,587	7,286
10	5,189	5,373	5,714	6,362
12	4,484	4,585	4,898	5,482

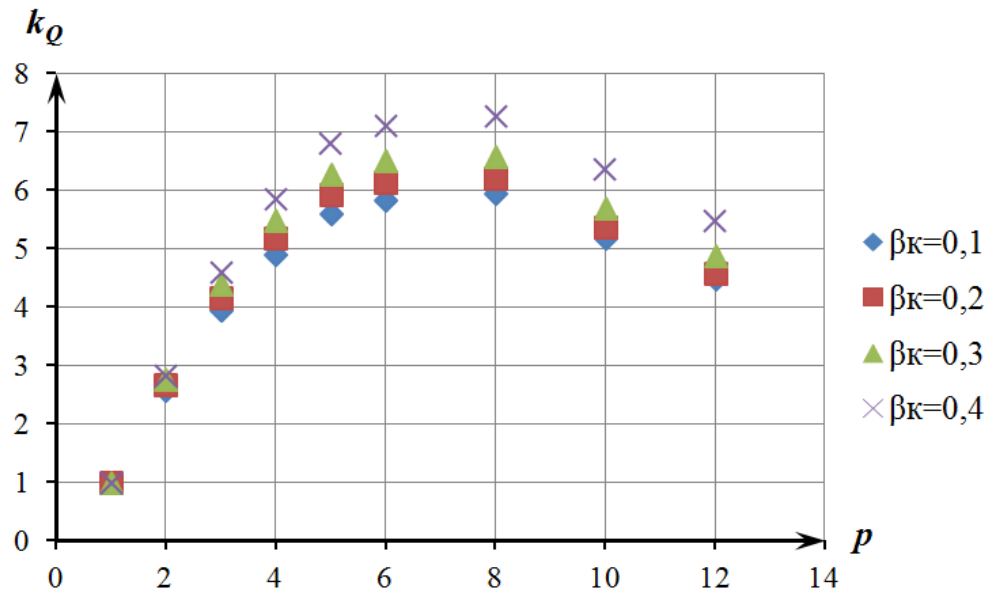


Рисунок 3.16 – Характер изменения относительной статической добротности от числа пар полюсов для первого типоразмера

Таблица 3.12 – Относительная статическая добротность от числа пар полюсов для второго типоразмера

$p \backslash \beta_k$	0,1	0,2	0,3	0,4
1	1	1	1	1
2	2,621	2,720	2,796	2,863
3	4,073	4,290	4,476	4,640
4	5,105	5,404	5,682	5,936
5	5,764	6,101	6,416	6,713
6	5,896	6,232	6,538	6,781
8	5,974	6,234	6,493	6,734
10	5,485	5,669	5,840	5,976
12	5,314	5,436	5,520	5,585

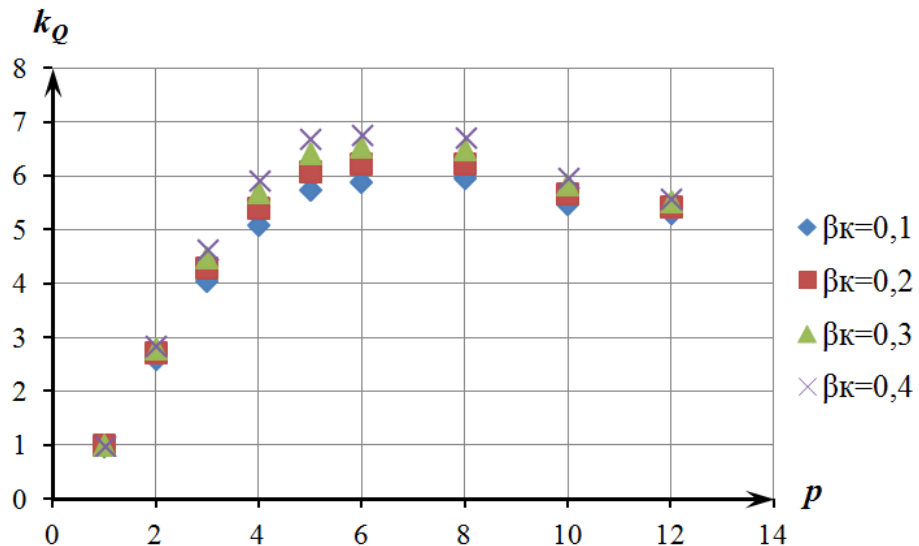


Рисунок 3.17 – Характер изменения относительной статической добротности от числа пар полюсов для второго типоразмера

Полученные результаты показали, что по сравнению с величиной момента, максимальная относительная статическая добротность наблюдается при большем числе пар полюсов. Параметр статической добротности предназначен для сравнительной оценки электродвигателей одного типа, а именно качества выполнения двигателей. В первую же очередь потребителя будет интересовать величина развиваемого момента. В нашем случае считаем, что наиболее оптимальным является выбор числа пар полюсов $p=5$. При этом длина пластины ленточной намотки $a_5=0,135/5=0,027$ м; отношение длины пластины к ширине ленты равно 0,54. При этом соотношении не наблюдается минимума сопротивления, и решающим фактором в выборе числа пар полюсов является закономерность изменения индукции.

Как показано выше, момент двигателя зависит от числа пар полюсов и характер его изменения определяется в основном величинами индукции под полюсом и сопротивления пластины. При разработке двигателя необходимо, чтобы величины индукции и сопротивления имели при данном числе пар полюсов экстремальные значения: индукция – максимум, сопротивление – минимум.

При заданных габаритных ограничениях для двигателя в диаметральной плоскости, в первую очередь необходимо провести анализ возможностей магнитной цепи для различного числа пар полюсов, определить вариант, при

котором индукция под полюсом будет максимальной. При найденном числе пар полюсов, исходя из заданной геометрии активных частей определяется средняя длина пластины. Ширина ленты b , из которой изготавливается намотка, должна быть выбрана из условия, что отношение длины пластины к ширине ленты должно быть в диапазоне (0,68-0,72) в зависимости от ширины контакта b_k . Последний выбирается из условия допустимой в нем плотности тока.

В связи с полученными рекомендациями можно будет указать, что двигатель выполненный по первому типоразмеру будет иметь следующие значения основных параметров:

- развиваемый момент $M_{I5} = M_{I1} \cdot k_{MI5} = 3 \cdot 3,245 = 9,735$ Н·м;
- потребляемая мощность $P_{I5} = P_{I1} \cdot k_{PI5} = 1227 \cdot 0,301 = 369,3$ Вт;
- статическая добротность $Q_{I5} = Q_{I1} \cdot k_{QI5} = 0,03 \cdot 5,915 = 0,18 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \sqrt{\text{Вт}}}$.

Аналогично, двигатель, выполненный по второму типоразмеру будет иметь следующие значения основных параметров:

- развиваемый момент $M_{II5} = M_{II1} \cdot k_{MII5} = 0,25 \cdot 3,635 = 0,91$ Н·м;
- потребляемая мощность $P_{II5} = P_{II1} \cdot k_{PII5} = 371 \cdot 0,355 = 131,7$ Вт;
- статическая добротность $Q_{II5} = Q_{II1} \cdot k_{QII5} = 0,03 \cdot 6,101 = 0,183 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \sqrt{\text{Вт}}}$.

В вышеприведенных выражениях первый сомножитель рассчитан в п. 3.2.5; второй сомножитель для первого типоразмера выбран из таблиц 3.7, 3.9, 3.11; для второго типоразмера – из таблиц 3.8, 3.10, 3.12.

Полученные расчетные величины моментов M_{I5} и M_{II5} максимальны и соответствуют случаю, когда полюс ротора находится у края пластины. В случае нахождения полюса в центре пластины, развиваемый момент будет меньше и находиться в пределах $(0,8 \div 0,85)M_{max}$. В итоге среднюю величину момента в пределах полюсного деления можно считать равной примерно $0,82M_{max}$.

Приведенные расчеты относятся к работе моментного двигателя в однофазном режиме. Чтобы осуществить работу в неограниченном диапазоне углов поворота ротора, необходимо использовать намотку второй фазы. При одновременной работе двух фаз, момент, развиваемый двигателем, будет увеличиваться до величины, приблизительно равной $1,5M_{max}$. В данном случае учтено снижение индукции в зазоре вследствие увеличения последнего при внесении намотки второй фазы. Понятно, что включение двух намоток увеличит потребляемую из сети мощность в два раза. При этих условиях можно считать, что характеристики предлагаемых двигателей будут иметь следующие величины:

$$M_{I5} = 1,5 \cdot 9,735 = 14,5 \text{ Н}\cdot\text{м}; P_{I5} = 738,6 \text{ Вт.}$$

$$M_{II5} = 1,5 \cdot 0,183 = 0,274 \text{ Н}\cdot\text{м}; P_{II5} = 263,4 \text{ Вт.}$$

Напомним, что полученные результаты рассчитаны при учете того, что токи для обоих рассматриваемых двигателей задавались величиной 100 А. Плотность тока в зоне контакта для двигателя первого типоразмера составляет 100 А/мм^2 , а второго – 200 А/мм^2 . Как показывают проведенные эксперименты с пластинами, выполненными из алюминиевой и медной фольги, при плотности тока в контакте 100 А/мм^2 существенного нагрева пластины не происходит, поэтому можно считать, что расчетная величина момента 14,5 Н·м для двигателя первого типоразмера может быть неизменной в течении относительно длинного промежутка времени. При плотности тока 200 А/мм^2 двигатель должен работать кратковременно; в этом случае намотка не разрушится.

Полученные результаты позволяют провести сравнение с бесконтактными моментными двигателями с гладким статором серии ДБМ, выпускаемыми заводом ОАО «Машиноаппарат» [55]. Для сравнения с двигателем первого типоразмера выбран двухфазный двигатель ДБМ130-1,6-0,5-2 с пусковым моментом 1,5 Н·м при напряжении фазы $U_{\phi}=27 \text{ В}$. Активное сопротивление фазы $R_{\phi}=3,6 \div 4,4 \text{ Ом}$, осевая длина 54,5 мм, внешний диаметр 130 мм, масса 2,5 кг. На основании приведенных данных определяется ток фазы $I_{\phi}=27/4=6,75 \text{ А}$, мощность потребления двух фаз $P=2 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi}=2 \cdot 6,75 \cdot 27=364 \text{ Вт}$.

Двигатель меньших габаритов ДБМ63-0,06-3-2 имеет следующие характеристики: пусковой момент $0,11 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $U_{\phi}=27 \text{ В}$, $R_{\phi}=7,4\div 9,2 \text{ Ом}$. Отсюда $I_{\phi}=27/8,5=3,18 \text{ А}$; $P=2\cdot 3,18\cdot 27=172 \text{ Вт}$.

Сравнение параметров двигателя с ленточной намоткой первого типоразмера с двигателем ДБМ показывает, что первый имеет момент в 9,65 раз больше, но при этом потребляет мощность из сети в 2 раза больше.

Для ленточного двигателя второго типоразмера развиваемый момент больше в 2,5 раза, потребляемая мощность в 1,5 раза больше.

Справедливости ради необходимо сделать следующие замечания. Существенно большие моменты у двигателей с ленточной намоткой рассчитаны при больших токах, требующих специальных источников питания, что на практике не всегда возможно; при меньших токах развиваемые моменты будут уменьшаться. Другое замечание заключается в том, что при расчете приведенных величин моментов не были учтены «реакция тока якоря», уменьшающая основной магнитный поток двигателя и влияние эффекта Холла. Если первый фактор может быть учтен, как показано в настоящей главе при рассмотрении одного участка намотки, то второй, вызывающий искажения линий распределенного тока, протекающего по пластинам намотки под действием магнитного поля, в настоящее время в литературе не рассмотрены.

Однако полученные результаты вселяют уверенность в то, что применение нового активного элемента – ленточной намотки, позволит создать новые моментные двигатели с улучшенными показателями. Появляется стимул для проведения дальнейших исследований в этом направлении. И только создание качественного макета и его исследования могут дать окончательный ответ о преимуществах предложенного варианта моментного двигателя.

3.5 Момент сопротивления от действия вихревых токов

При исследовании моментного двигателя с ленточной намоткой статора в качестве импульсного двигателя-маховика [26, 48] необходимо рассматривать совокупность двух режимов работы двигателя – разгона и выбега. В режиме

выбега, после окончания подачи питания, скорость вращения ротора-маховика уменьшается под действием моментов сопротивления. Интерес представляет задача по определению момента сопротивления, вызванного действием вихревых токов с помощью программного продукта конечно-элементного моделирования Agros2D [42, 78, 95].

Agros2D – это некоммерческий многоплатформенный программный продукт, разработанный в Западно-Чешском университете в Пльзене, и позволяющий решать различные физические задачи с использованием библиотеки Hermes. В частности, в работах [80, 94, 96, 97] проведен ряд экспериментов по численному моделированию задачи индукционного нагрева заготовки из немагнитного материала при ее вращении в системе неподвижных постоянных магнитов. В этом случае проводится интегрирование по объему удельных потерь от вихревых токов для определения мощности тепловых потерь, выделяемой при этом. Используя вспомогательные видеоматериалы [78] и возможности Agros2D, удалось решить задачу по определению момента сопротивления, вызванного действием вихревых токов в ленточной намотке статора моментного двигателя, работающего в режиме выбега.

Математическая модель задачи представляется совокупностью двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, которые описывают распределение магнитного и температурного полей в системе [12, 56, 96]:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}(\operatorname{rot}A - B_r)\right) - \gamma \mathbf{v} \times \operatorname{rot}A = 0,$$

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}T) = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}T \right) - p_J,$$

где μ – магнитная проницаемость; A – векторный магнитный потенциал, который в рамках условия Дирихле равен 0; B_r – остаточная индукция; γ – электропроводность; \mathbf{v} – вектор локальной скорости вращения;

λ – теплопроводность; ρ – плотность; c_p – удельная теплоемкость; p_J – удельные потери, образованные наведенной плотностью тока во вращающейся намотке.

Для моделирования задачи в Agros2D, конфигурация моментного двигателя была несколько упрощена (рисунок 3.18) [34]. Магнитная цепь выполнена из стального сердечника и двух пар постоянных магнитов. Индукция магнитного потока в воздушном зазоре подобрана исходя из параметров макета, и равна 0,06 Тл. В зазоре помещен эквивалент ленточной намотки, представляющий собой сплошное алюминиевое кольцо, геометрия которого совпадает с активной частью намотки макета. Начальная температура системы составляет 20°C, частота вращения магнитной системы небольшая, нагревом ленточной намотки от действия вихревых токов пренебрегаем.

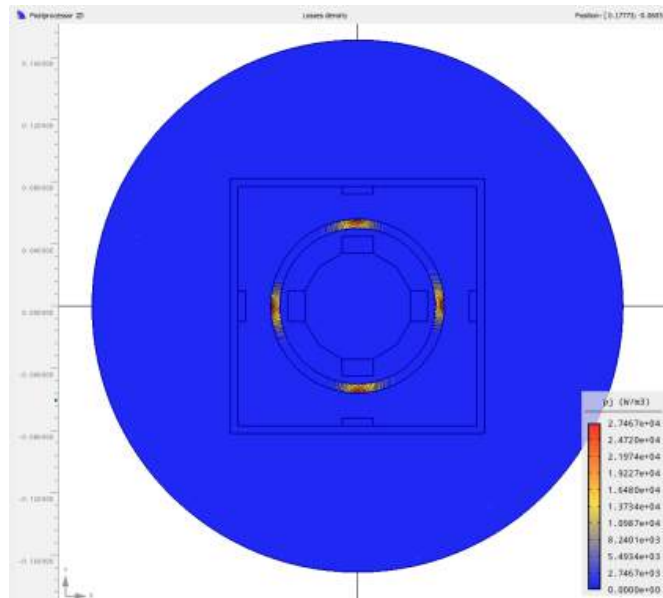


Рисунок 3.18 – Распределение удельных потерь от вихревых токов в эквиваленте намотки

Скорость вращения эквивалента ленточной намотки задавалась в диапазоне от 0,1 об/с до 5 об/с. В результате моделирования была получена картина распределения удельных потерь в теле намотки (рисунок 3.18). Проведя интегрирование по объему удельных потерь и соответствующие вычисления, получены значения мощности тепловых потерь, вызванных вихревыми токами при конкретных значениях скорости. Как известно, механическая мощность, затраченная на торможение двигателя в режиме выбега, проявляется в виде мощности тепловых потерь. Поэтому, исходя из выражения $P_{mex} = M_{вт} \cdot \omega$, можно

определить тормозной момент, вызванный действием вихревых токов. На рисунке 3.19 представлен график зависимости тормозного момента от частоты вращения эквивалента ленточной катушки.

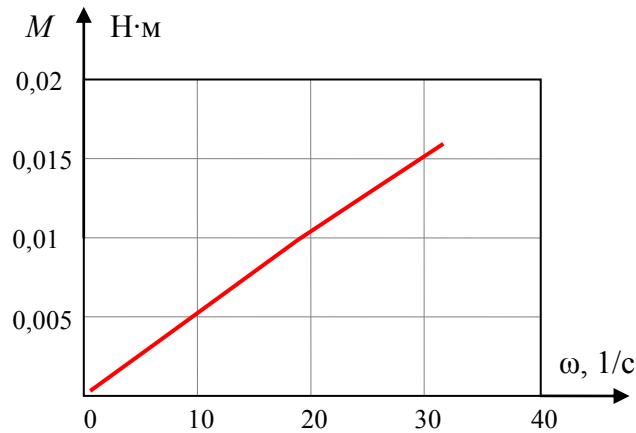


Рисунок 3.19 – График зависимости тормозного момента от частоты вращения

Аналитически рассчитана крутизна характеристики

$$k = \frac{M_{em}}{\omega} = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

Проведенные экспериментальные исследования, описанные в главе 4 настоящей работы, близки к полученным результатам аналитического исследования.

Такой подход к определению крутизны характеристики тормозного момента от вихревых токов может быть применен при расчете динамики системы моментного двигателя с ленточной катушкой статора.

3.6 Момент двигателя с учетом реакции тока ленточной катушки

Для оценки влияния тока катушки на основной поток двигателя в COMSOL Multiphysics была создана модель ленточной структуры и магнитной цепи с числом пар полюсов $p=5$, поскольку максимальные величины магнитной индукции и развиваемого момента на этапе анализа наблюдались при данном числе пар полюсов. В качестве исходных размеров магнитной системы были выбраны величины второго типоразмера, как соответствующие наиболее применяемым в промышленности моментным двигателям [55, 88, 93, 99].

Исследуемая в предыдущих пунктах настоящей работы параметрическая модель магнитной цепи двигателя была дополнена ленточной намоткой на гильзе с числом слоев $N=25$ при толщине ленты вместе с изоляцией $\Delta=0,0001$ м; относительная ширина контакта выбрана $\beta_k=0,2$. (рисунок 3.20).

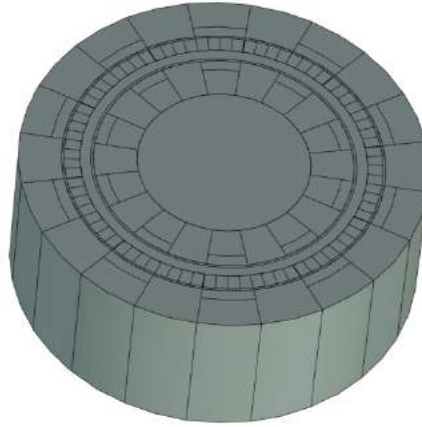


Рисунок 3.20 – Параметрическая модель магнитной цепи двигателя с ленточной структурой в программе T-flex CAD

Ленточная намотка выполнена из меди (Copper – в библиотеке материалов COMSOL), сплошной, без разделения на слои. По боковым ее краям расположены вырезы, обеспечивающие диагональный характер протекания тока по пластинам намотки. Таким образом, ленточную намотку можно представить последовательным соединением десяти пакетов пластин, расположенных по кругу. Каждый пакет был разделен на восемь одинаковых частей вдоль длины пластин и на три части вдоль осевой длины двигателя. Дискретизация ленточной намотки в данном случае соответствует методике, приведенной в п. 2.2.3 настоящей работы, и применяется для моделирования взаимного положения магнитной системы (полюса шириной c) и ленточной намотки и, соответственно, для построения зависимости момента от перемещения полюса магнита (рисунок 3.21).

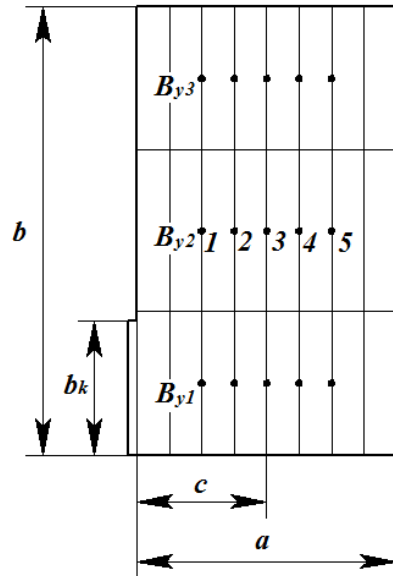


Рисунок 3.21 – Фрагмент ленточной намотки с разбиением на участки

В качестве материала гильзы, на которую наматывается лента, выбран немагнитный материал – оксид бериллия BeO , также из библиотеки материалов пакета COMSOL. Толщина гильзы составила 0,0017 м.

Исследования были проведены для двух величин тока, протекающего через контакты намотки: 50А и 100 А. Однако учитывая, что для упрощения численного моделирования рассматривается сплошная, без деления на слои конфигурация ленточной намотки, с помощью опции пакета COMSOL Single-Turn Coil (Gap Feed) к одному из контактов намотки приложен суммарный ток 1250А и 2500 А соответственно. Данные величины полного тока получены с учетом числа витков $N=25$.

При отсутствии тока через ленточную намотку и при условии, что магнитное поле однородное, магнитная цепь обеспечивает в зазоре индукцию 0,4 Тл. При пропускании тока через намотку происходит смещение основного магнитного потока. Характер такого смещения зависит от положения полюса относительно намотки (рисунок 3.22). Величины индукции в этом случае приведены в таблице 3.13. По центру воздушного зазора замерялась компонента индукции магнитного потока, перпендикулярная плоскости единичной пластины ленточной намотки, в данном случае B_y , в точках, показанных на рисунке 3.21 при моделировании взаимного перемещения ленточной намотки и магнитной системы

с некоторым шагом. При этом первое положение ферромагнитного полюса находится у одного края пластины, последнее (пятое) положение – у другого края пластины. Указанные положения центра полюса на рисунке 3.21 обозначены точками 1,2,3,4,5. На этом же рисунке первое положение магнита, а также ширина полюса, обозначены как c . В этом случае производится определение индукции в точках B_{y1} , B_{y2} , B_{y3} .

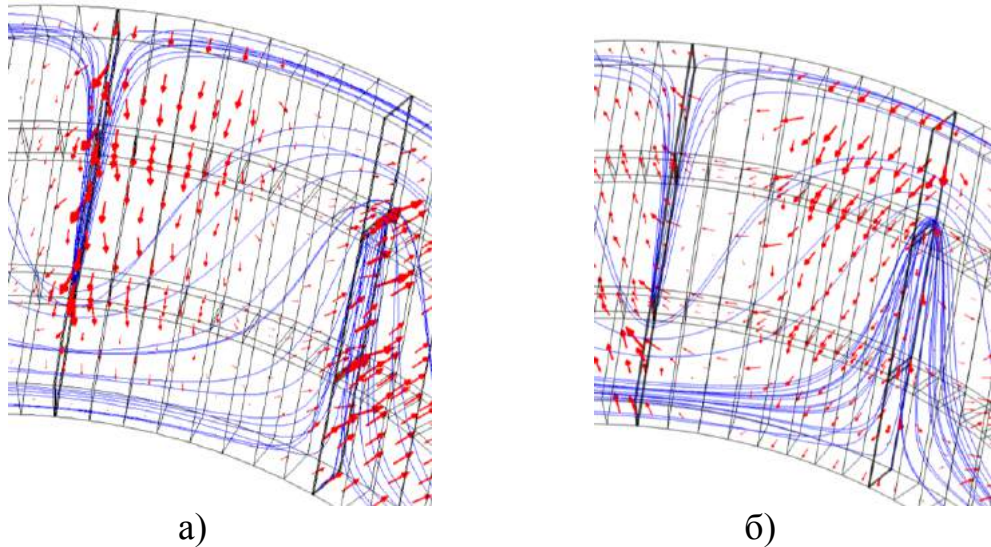


Рисунок 3.22 – Характер распределения индукции основного магнитного потока при наличии тока через ленточную катушку:
а – при первом положении полюса; б – при пятом положении полюса

Таблица 3.13 – Характер изменения индукции основного магнитного потока при действии тока ленточной катушки

Положение полюса	$I=50 \text{ A}$			$I=100 \text{ A}$		
	B_{y1} , Тл	B_{y2} , Тл	B_{y3} , Тл	B_{y1} , Тл	B_{y2} , Тл	B_{y3} , Тл
1	-0,3083	-0,4501	-0,5028	-0,2329	-0,5135	-0,6166
2	-0,3008	-0,4211	-0,4974	-0,2128	-0,4504	-0,6008
3	-0,2935	-0,3931	-0,4914	-0,1971	-0,3944	-0,5879
4	-0,2857	-0,3653	-0,4821	-0,1820	-0,3387	-0,5700
5	-0,2781	-0,3337	-0,4727	-0,1663	-0,2758	-0,5510

Для определения момента, развиваемого двигателем, при моделировании взаимного перемещения ленточной катушки и магнитопровода, в каждом из указанных на рисунке 3.21 положений полюса был определен интеграл осевой компоненты плотности тока по объему катушки [51, 81]. Полученные результаты

приведены в таблице 3.14. Необходимо отметить, что данные для плотности тока дополнительно были получены также для случая отсутствия основного магнитного потока. Результаты идентичны полученным в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Интеграл осевой компоненты плотности тока по объему катушки

Положение полюса	$I=50 \text{ А}$			$I=1000 \text{ А}$		
	$j_{z1}, \text{ А}\cdot\text{м}$	$j_{z2}, \text{ А}\cdot\text{м}$	$j_{z3}, \text{ А}\cdot\text{м}$	$j_{z1}, \text{ А}\cdot\text{м}$	$j_{z2}, \text{ А}\cdot\text{м}$	$j_{z3}, \text{ А}\cdot\text{м}$
1	1,7611	5,6250	1,5640	3,5255	11,2500	3,1280
2	1,7947	5,1400	1,6254	3,5894	10,2800	3,2508
3	1,7057	4,9678	1,7056	3,4113	9,9355	3,4112
4	1,6255	5,1400	1,7946	3,2509	10,2800	3,5892
5	1,5640	5,6250	1,7609	3,1280	11,2500	3,5218

Используя данные таблиц 3.13 и 3.14, рассчитана сила для одного пакета пластин при каждом положении полюса как произведение магнитной индукции и интеграла осевой компоненты плотности тока по объему катушки. Развиваемый двигателем момент определен произведением полученной силы на средний радиус ленточной катушки. Значение среднего радиуса дано в п. 3.2.5 настоящей работы. Результаты расчетов приведены кривыми на рисунке 3.23.

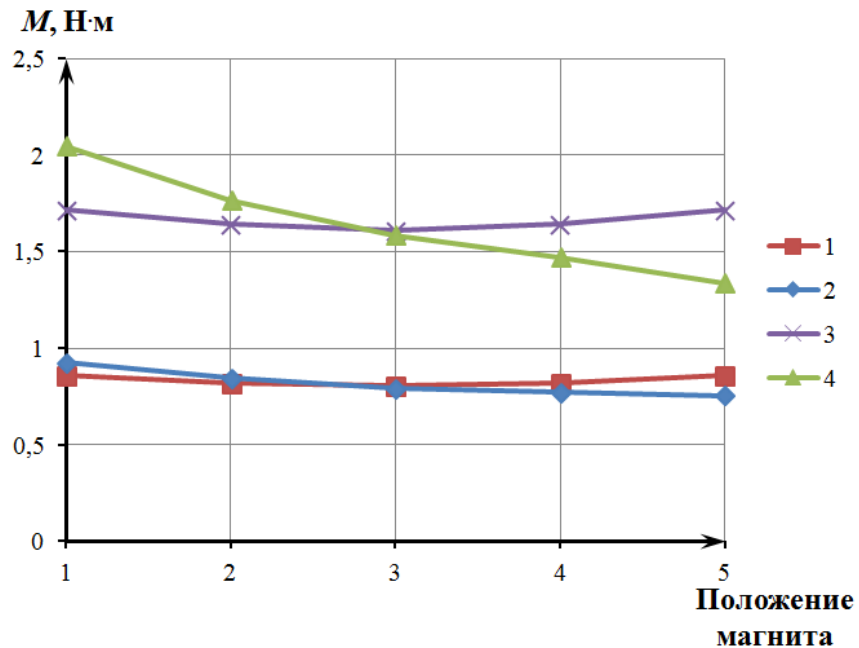


Рисунок 3.23 – Характер изменения момента при протекании тока по катушке

Нижняя группа кривых 1 и 2 на рисунке 3.23 относится к току через контакты ленточной намотки 50 А, верхняя 3 и 4 – 100 А. Следует вывод, что под действием реакции тока намотки характеристика (кривые 2 и 4), связывающая развиваемый двигателем момент и угол поворота ротора, деформируется, а именно происходит вращение относительно ее центра. При реверсе тока поворот характеристики происходит в противоположном направлении.

Кривые на рисунке 3.23 получены при нахождении магнита в пределах площади пластины. На рисунке 3.24 приведена зависимость момента от взаимного положения намотки и магнитопровода для тока через контакты намотки 50 А для двух последовательно расположенных пакетов пластин намотки с учетом одновременного взаимодействия магнита с этими пакетами.

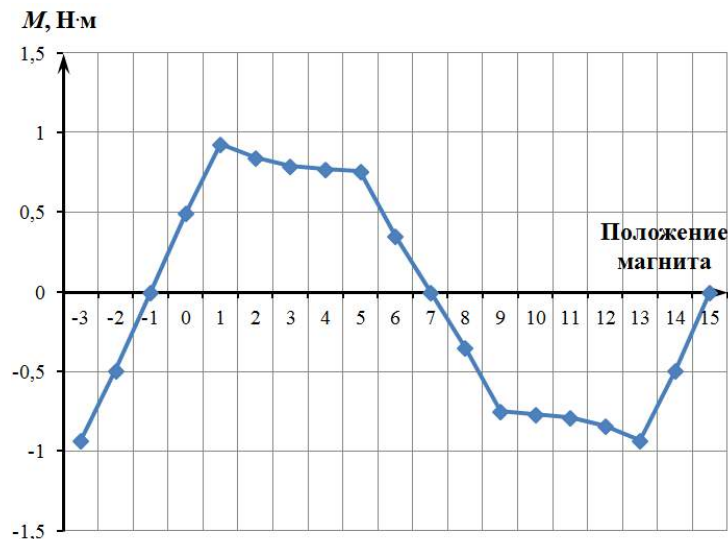


Рисунок 3.24 – Характер изменения момента с учетом тока намотки для двух соседних пакетов пластин

3.7 Момент с учетом реакции тока ленточной намотки на примере вентильного двигателя

Отдельный интерес представляет вопрос применения ленточной намотки в электромеханических устройствах [35]. Ниже рассмотрены некоторые аспекты создания двухфазного вентильного двигателя и момент, развиваемый им с учетом реакции тока намотки.

Для простоты пояснения рассмотрим моментный двигатель с одной парой полюсов и одновитковой намоткой (рисунок 3.25).

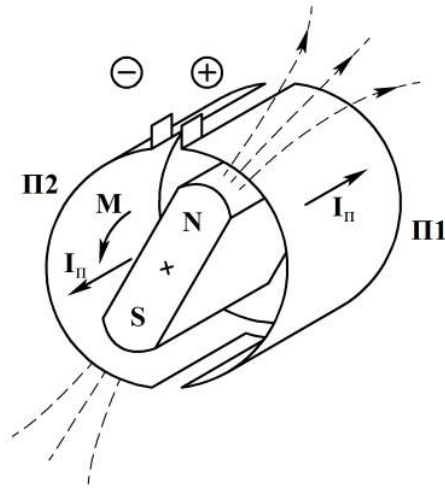


Рисунок 3.25 – Простейший моментный двигатель

На рисунке 3.26 показана развертка намотки, которую рассматриваем изнутри. На этом рисунке полюса ротора расположены над пластинами П1 и П2 и направление силовых линий магнитного поля показано соответствующим образом рядом с обозначением полюсов N и S .

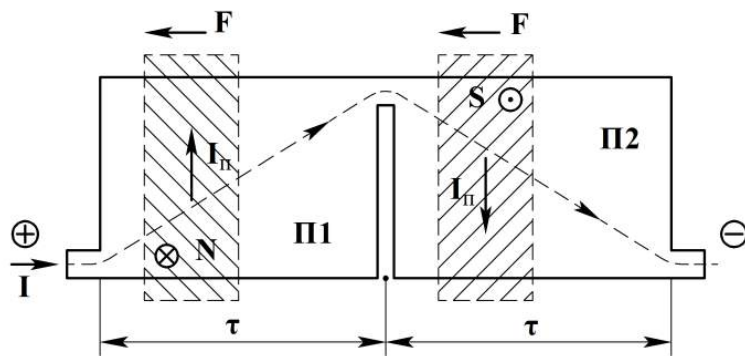


Рисунок 3.26 – Развертка одновитковой намотки

В результате взаимодействия магнитного поля полюсов с поперечными компонентами распределенного тока (на рисунке показаны их результирующие I_n в области протекания магнитного потока) на полюсы ротора будут действовать силы F , создающие момент M . Под действием этого момента ротор будет вращаться в положительном направлении – против часовой стрелки. Указанный момент будет иметь положительное направление и ненулевую величину до того положения, когда центры полюсов будут совмещены с вырезами намотки. При этом магнитные потоки левых и правых половин полюсов будут взаимодействовать с равными, но имеющими противоположный знак величинами тока I_n . Если продолжать перемещать полюсы в том же направлении, то

развиваемый момент изменит свой знак. В частности, если полюс N перейдет на пластину П2, а полюс S – на пластину П1, то момент начнет действовать по часовой стрелке (станет отрицательным). Если перейти к многополюсной конструкции, то можно указать, что действие всех полюсов ротора, в том числе противоположных полярностей, приводит к аналогичному эффекту и суммарный момент двигателя будет равен моменту, создаваемому взаимодействием с распределенным током пластины магнитного потока одного полюса, умноженного на число полюсов ротора. Вид зависимости развиваемого момента от положения центра одного из полюсов будет соответствовать характеру изменения силы, отображенному рисунками 2.6 и 2.16 (п. 2.3 настоящей работы). В дальнейшем будем полагать, что геометрия намотки и магнитной цепи обеспечивают зависимость, соответствующую "треугольной" форме характеристики (рисунок 3.27,а), получение которой ранее пояснено рисунком 2.16 (п. 2.3 настоящей работы). На рисунке 3.27 координата α – угол поворота ротора.

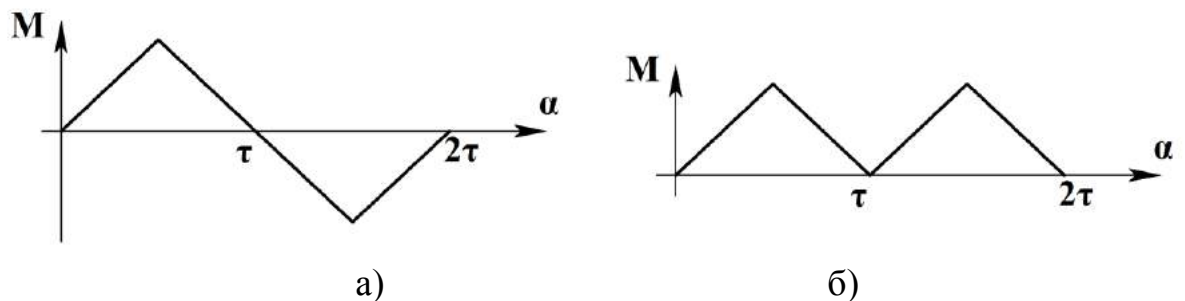


Рисунок 3.27 – Момент, развиваемый двигателем

Дальнейшее вращение ротора в заданном направлении будет возможным, если момент в любом положении ротора будет иметь один и тот же знак (рисунок 3.27,б). Указанное возможно при изменении направления протекания по намотке тока посредством соответствующего переключения цепи питания по сигналу с датчика положения ротора ДПР (рисунок 3.28). Переключение должно проводиться в момент, когда центры полюсов совмещаются с вырезами намотки. Предположим, что ДПР построен на основе индуктивного датчика и его ротор выполнен на основе диска из ферромагнитного материала соответствующей формы. Отметим, что направление диаметрального среза ротора совпадает с

направлением, связывающим центры полюсов ротора двигателя. На рисунке введены обозначения: ЛН – ленточная намотка, КЭ – ключевой элемент.

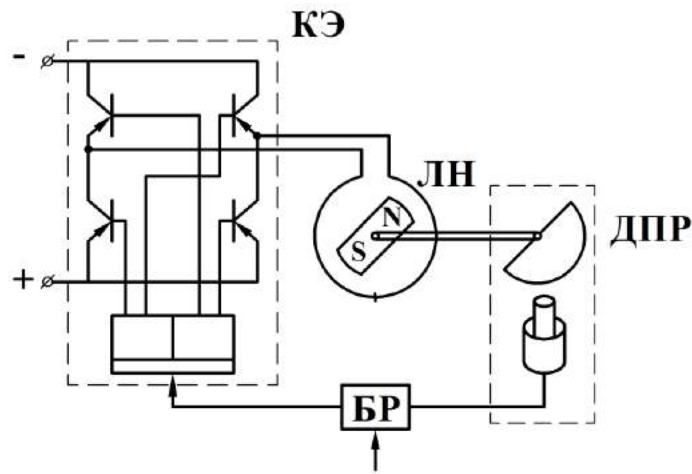


Рисунок 3.28 – Применение датчика положения ротора для переключения цепи питания

При необходимости изменения направления вращения (знака создаваемого момента) протекание тока по намотке должно происходить в направлении, противоположном исходному. Это можно осуществить посредством блока реверса БР, в котором происходит инвертирование сигнала с ДПР.

Очевидно, что рассмотренная схема двигателя имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что вблизи вырезов ленточной намотки развиваемый момент близок к нулю. Выходом из положения является применение еще одной ленточной намотки, вырезы которой смещены относительно первой на половину полюсного деления [11]. В этом случае на характеристике результирующего момента точки с нулевым моментом будут отсутствовать. Отметим также важное обстоятельство, что если зависимости развиваемых моментов обеих намоток будут идентичными и представлять сочетание равнобедренных треугольников, то результирующий момент двигателя будет неизменным при всех положениях ротора; в идеале пульсации момента будут отсутствовать (рисунок 3.29).

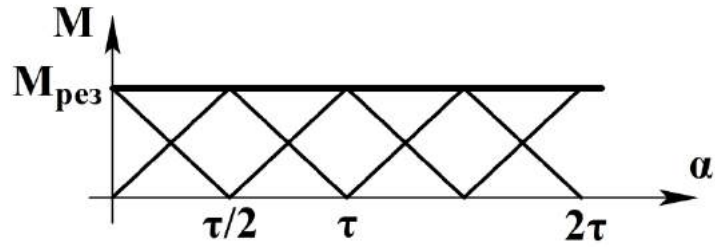


Рисунок 3.29 – Момент вентильного двигателя

Вторая намотка, соосная с первой и находящаяся под действием одного и того же магнитного потока ротора, может быть расположена рядом в осевом направлении, выполняться при одновременном наматывании двух лент, либо быть размещена концентрически, охватывая первую. Схема такого двигателя приведена на рисунке 3.30, где обозначения элементов соответствуют аналогичным, показанным на рисунке 3.26.

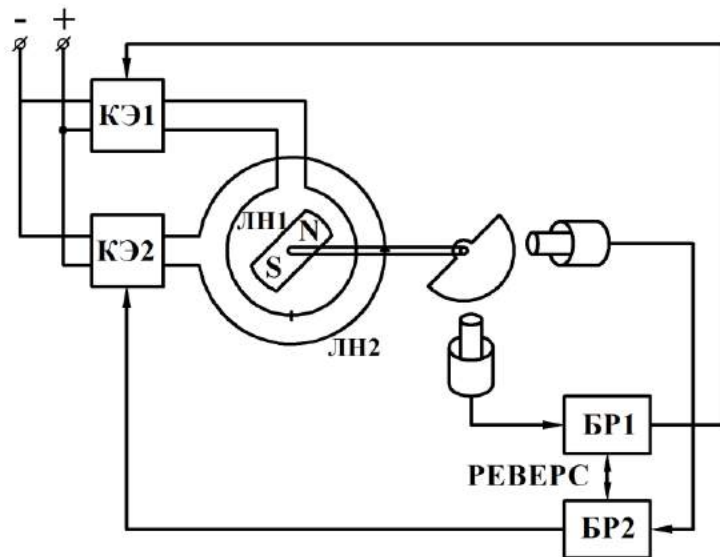
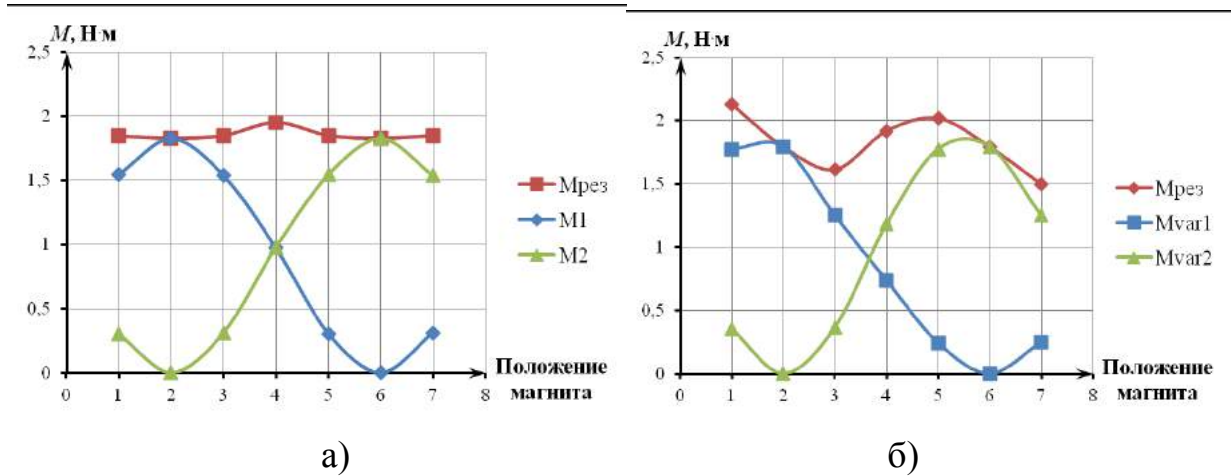


Рисунок 3.30 – Схема вентильного двигателя

При помощи программного продукта COMSOL были проведены численные исследования пульсаций момента при протекании токов разной величины через контакты совокупности двух намоток. Для этого в подготовленной в T-flex CAD модели была модифицирована структура ленточной намотки с помощью введения дополнительных боковых вырезов для получения "треугольной" характеристики согласно рисунку 2.16 В результате численного моделирования по методике, изложенной в предыдущем пункте, получены результирующие характеристики

момента вентильного двигателя без учета действия тока катушки (рисунок 3.31,а) и с учетом его действия (рисунок 3.31,б).



а) б)
Рисунок 3.31 – Результирующая характеристика момента от угла поворота ротора

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что при токе 50 А амплитуда пульсаций результирующей моментной характеристики увеличилась примерно в четыре раза.

Выводы к главе 3

1. Получено выражение для момента двигателя с ленточной катушкой и показано влияние составляющих, входящих в данное выражение, на момент.
2. Получены выражения для относительного момента, относительной потребляемой мощности и относительной статической добротности для определения характеристик двигателя при различном числе пар полюсов.
3. Разработана конечно-элементная модель моментного двигателя с ленточной катушкой с возможностью изменения числа пар полюсов и величины воздушного зазора, позволяющая определить характер изменения составляющих выражения для относительного момента.
4. Рассчитаны значения развиваемого двигателем момента, потребляемой мощности и статической добротности при одной паре полюсов для двух типоразмеров двигателя с ленточной катушкой, позволяющие получить значения данных характеристик при других значениях числа пар полюсов.

5. Проведено сравнение полученных результатов для двух рассмотренных типоразмеров моментного двигателя с ленточной намоткой с выпускаемыми фирмой "Машиноаппарат" (г. Москва) бесконтактными моментными двигателями с гладким статором серии ДБМ. Показано, что пусковой момент исследуемого двигателя превосходит аналоги более чем в 2,5 раза.
6. Численными методами получена характеристика, связывающая тормозной момент, вызванный действием вихревых токов в намотке моментного двигателя от частоты вращения магнитопровода. Полученные данные близки к результатам эксперимента, приведенного в главе 4 настоящей работы.
7. Разработан метод определения зависимости момента от угла поворота ротора с учетом действия распределенного тока ленточной намотки (реакции якоря).
8. Предложена схема двухфазного вентильного двигателя с ленточной намоткой и показана зависимость пульсаций развиваемого им момента к углу поворота ротора от величины протекающего по намотке тока.

ГЛАВА 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА МОМЕНТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЛЕНТОЧНОЙ НАМОТКОЙ

4.1 Тепловая стойкость ленточной намотки

Одним из основных преимуществ применения ленточной намотки является повышение удельных характеристик моментного двигателя за счет протекания достаточно большого тока при наличии хорошего теплоотвода. Кроме того, прежде чем переходить к макетированию моментного двигателя с пакетным элементом или ленточной намоткой, необходимо провести исследования тепловой стойкости активного элемента с целью оценки его перегрева. Поскольку увеличение протекающего по намотке тока может вызвать повышенное выделение тепла на активных сопротивлениях составляющих ее пластин, это может привести к нежелательным последствиям, в частности к разрушению ленточной намотки. Дальнейшие исследования проведены для составной части ленточной намотки – пакетного элемента [41].

В качестве основы для изготовления пакетного элемента была выбрана лента из алюминиевой фольги толщиной 0,07 мм, на которой с одной стороны нанесена с помощью клея бумажная изоляция. Ширина ленты – 50 мм. Пакетный элемент изготавливается из этой ленты методом сгиба ее в "гармошку". Необходимый характер протекания по отдельным пластинам электрического тока достигается соответствующими вырезами в ленте в местах ее перегиба. В соответствии с [60] эти места представляют собой перемычки, площади сечения которых существенно меньше сечений основной части пластин, и в которых ожидается значительное увеличение плотности тока. Другими словами эти участки сужения площади сечения представляют собой зоны повышенного тепловыделения, а оставшиеся участки поверхности пластин можно считать зонами охлаждения.

Методика проведения экспериментальных исследований заключается в том, что в теле отдельной пластины пакетного элемента создаются зоны сужения сечения, через которое протекает ток, и фиксируется закон изменения температуры теплонапряженного участка. Геометрия исследуемых пластин приведена на рисунке 4.1.

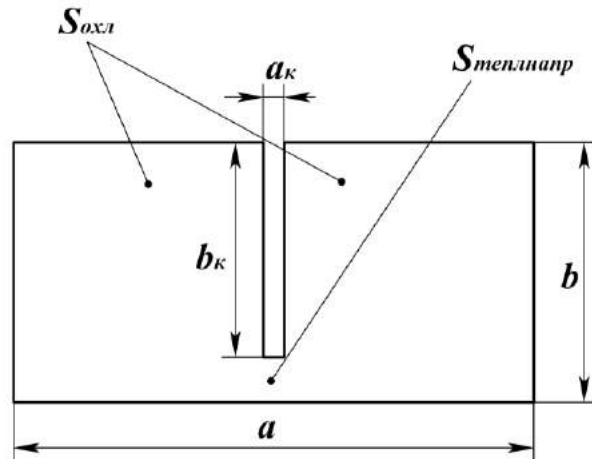


Рисунок 4.1 – Геометрия исследуемой пластины

В данном случае общие размеры пластины выбирались как 100x50 мм, ширина теплонапряженного участка у пластин менялась в диапазоне $b_k=5\div 20$ мм, а длина этого участка a_k задавалась $0,5\div 1$ мм.

Измерение температуры теплонапряженного участка производилось как с помощью термопары, входящей в состав электронного мультиметра VC9808, оптического пирометра АКПП-9307, так и посредством металлического термометра сопротивления. При этом последний прием измерения температуры оказался наиболее стабильным. Термометр сопротивления изготавливался из медной изолированной проволоки диаметром 0,09 мм и длиной 2-2,5 метра, которая наматывалась на тот участок, температуру которого необходимо измерять. Зная температурный коэффициент сопротивления материала проволоки, температуру окружающей среды и изменение сопротивления нагретой проволоки, достаточно просто можно определить температуру нагретого участка пластины. Сопротивление проволочного датчика измерялось с помощью миллиомметра Е6-18 и цифрового мультиметра VC9808. По исследуемой пластине пропускался как постоянный ток силой до 50 А, так и переменный, с

действующим значением до 50 А, и через каждые 10 с определялась искомая температура. Пластина закреплялась в специальном приспособлении, как показано на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Исследуемая пластина

Исследования пластины проводились для двух вариантов: когда одна верхняя ее поверхность контактировала с воздухом, и когда эта поверхность закрывалась теплоизолирующей накладкой в виде сукна. Нижняя поверхность пластины соприкасалась с основанием приспособления, выполненного из древесно-волокнутого материала. В открытом, без теплоизолятора, случае, при плотности тока в месте сужения до 200 А/мм^2 температура тела пластины не превышала $80\text{-}100^\circ\text{C}$ при длительности протекания тока 15-20 мин. При наличии теплоизолятора температура была выше 100°C , но разрушения места сужения не наблюдалось.

При больших величинах тока (при плотности тока в местах сужения до 400 А/мм^2) исследования проводились совместно с алюминиевой пластиной-радиатором. Длительность протекания тока составляла 20-25 мин, радиатор нагревался до температуры $100\text{-}120^\circ\text{C}$, но разрушения пластины не наблюдалось.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 4.3. На этом рисунке показаны лабораторный автотрансформатор, понижающие трансформаторы, выпрямительный блок, пластина-радиатор с закрепленным на ней термометром сопротивления.

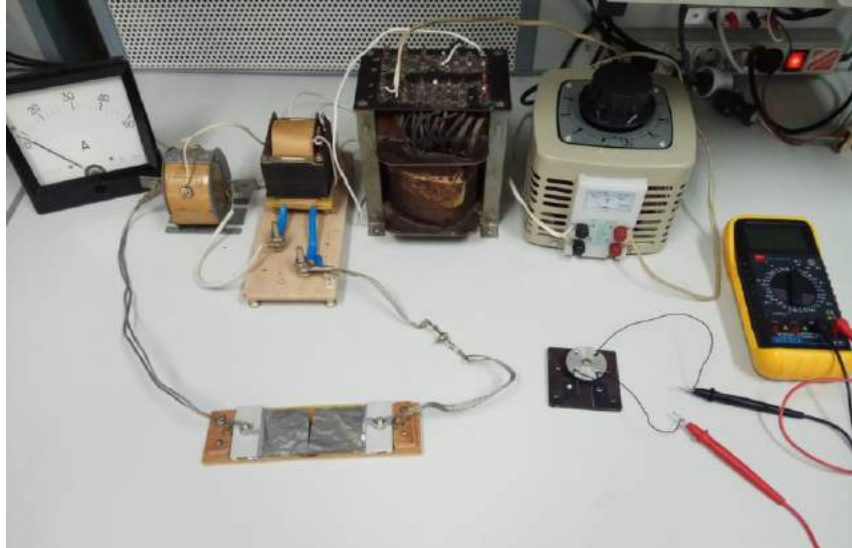


Рисунок 4.3 – Общий вид экспериментальной установки

Кроме того были проведены эксперименты по исследованию собранного пакета, содержащего 20 пластин. В таком случае происходит взаимное нагревание соседних пластин. По конструктивным соображениям на пакете в верхней и нижней его поверхностях были закреплены плоские пластины из алюминиевого сплава толщиной 0,8 мм, служащие, как для поддержания геометрической конфигурации пакета, так и для организации токоподвода. На пакет был намотан металлический термометр сопротивления из тонкой медной проволоки и по известной методике произведено определение его температуры при протекании по его пластинам тока силой 20 А, плотность тока при этом составила $28,6 \text{ А/мм}^2$. Результаты данного эксперимента приведены на рисунке 4.4.

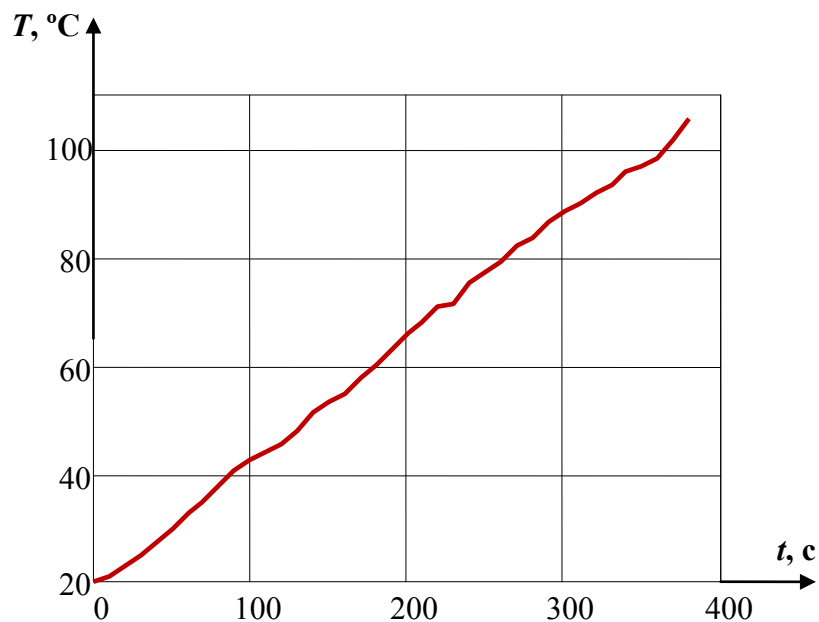


Рисунок 4.4 – Характер нагрева пакетного элемента

Из приведенного графика следует, что длительность проведения исследования макета исполнительного элемента без серьезных для него последствий может достигать 5-6 минут, что бывает вполне достаточным для определения необходимых параметров макета. Повышенный нагрев пакетного элемента, вызванный протеканием по нему тока, можно объяснить большими длинами перемычек, между пластинами в пакете, собранном методом сгиба ленты в "гармошку", как показано на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Фрагмент пакетного элемента

Полученные результаты дают уверенность в том, что ленточная намотка, при наличии хорошего отвода тепла на корпус двигателя, будет являться вполне работоспособным элементом конструкции.

4.2 Экспериментальная установка для исследования пакетного элемента. Результаты эксперимента

Для проведения исследований с целью экспериментальной проверки положений, положенных в принцип работы моментного двигателя с ленточной намоткой, была поставлена задача спроектировать и изготовить соответствующую установку. Основные требования к экспериментальной установке заключались в том, что она должна быть выполнена достаточно простой, требующей минимальный объем настроечных операций, должна быть изготовлена из доступных материалов и комплектующих изделий. Методика проведения исследований на этой установке должна быть предельно простой и безопасной для участников. Основная задача, решаемая при проведении исследований, заключается в определении силы, развиваемой при взаимодействии

источника магнитного поля и тока, протекающего по пакетному элементу. Полученные результаты совместно с теоретическими выкладками должны показать путь дальнейших исследований с целью усовершенствования предложенного приема создания тяговой силы в исполнительном устройстве.

Характер изменения силы в рабочем диапазоне взаимных перемещений источника магнитного поля и пакетного элемента в основном определяется компонентой тока I_y , протекающего по пластинам последнего. В связи с этим в установке должна быть обеспечена возможность простой и быстрой замены пакетных элементов с различной конфигурацией пластин, составляющих пакеты. Учитывая то, что при изготовлении пакетного элемента, при отсутствии достаточно отработанной технологии, число пластин в пакете большим получить не удастся, для создания необходимой силы через пакет пластин будем пропускать достаточно большой ток (до 20 А). При этом встают задачи соответствующего выбора источника постоянного тока и разработки конструкции пакетного элемента, способного выдержать такие токи. Решение последней задачи основано на результатах, полученных в предыдущем пункте.

Основой экспериментальной установки является лист электроизоляционного материала, на котором крепятся все ее узлы (рисунок 4.6) [40]. С целью упрощения конструкции подвеса подвижного источника магнитного поля применена схема с вертикальной осью, вокруг которой в шарикоподшипниках вращается штанга, на одном конце которой закреплен источник магнитного поля, а на другом – противовес, обеспечивающий отсутствие маятникового момента, способного внести искажения в результаты экспериментальных исследований.



Рисунок 4.6 – Общий вид экспериментальной установки

Источник магнитного поля представляет собой набор постоянных магнитов из сплава ЮНДК35Т5 и элементов магнитопровода, выполненных из конструкционной стали. В зазоре магнитопровода, шириной 18 мм, в который должен помещаться пакет из алюминиевых пластин, создается индукция $B=0,038$ Тл. Значение этой индукции измерено милливеберметром марки М119.

Пакетные элементы изготовлены из алюминиевой ленты толщиной 0,07 мм и бумажной изоляции. Толщина пакета зависит от количества в его составе пластин (слоев); при указанной выше величине воздушного зазора пакет может содержать до 60 пластин. Можно в зазор поместить и более толстый пакет, при этом необходимо в конструкцию источника магнитного поля добавить дополнительный постоянный магнит. Эксперимент показывает, что в этом случае индукция в зазоре уменьшается незначительно.

На основании установки смонтирован узел крепления пакетного элемента, помещаемого в воздушный зазор магнитопровода источника постоянного магнитного поля (рисунок 4.7).

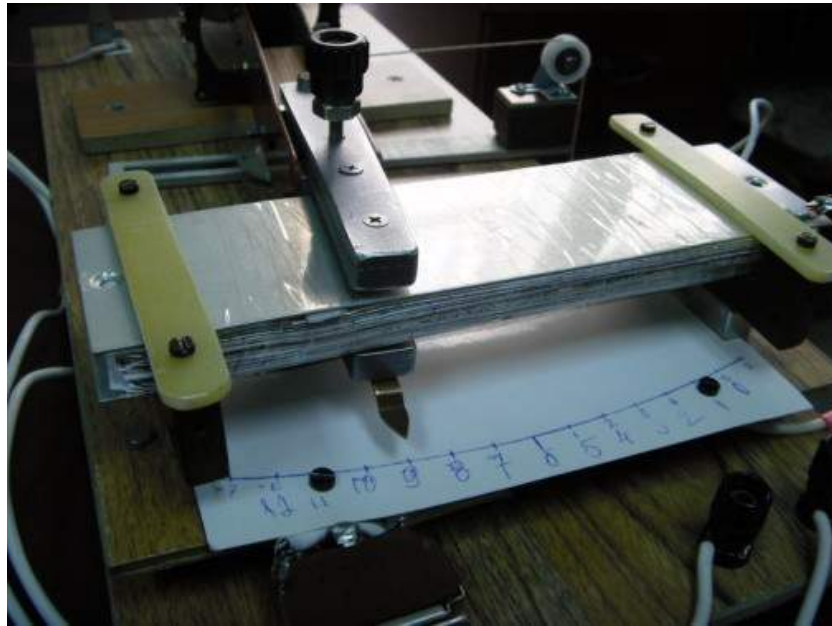


Рисунок 4.7 – Пакетный элемент в воздушном зазоре магнитопровода

Замена пакета производится достаточно легко и быстро за счет применения механических прижимов и электрических соединителей. На основании смонтированы также элементы коммутации и присоединения к электрической цепи.

Для задания необходимого взаимного положения источника магнитного поля и пакетного элемента имеются неподвижная шкала и указатель, закрепленный на штанге.

Механическая нагрузка прикладывается к подвижному элементу посредством тарированного груза на нити, соединяемой со штангой и проходящей по желобу ролика. Выставка необходимого взаимного расположения источника магнитного поля и пакетного элемента осуществляется при помощи регулируемого ограничителя, представляющего собой винт, вращаемый в неподвижно закрепленном на основании специальном кронштейне. Этот винт является также и элементом электрической цепи сигнализации, разрываемой в случае превышения исполнительным устройством усилия, развиваемого подвешенным на нити грузом.

Методика проведения исследований заключается в том, что предварительно с помощью регулируемого ограничителя выставляется необходимое взаимное расположение источника магнитного поля и неподвижного пакета. Это

положение фиксируется при помощи шкалы. Затем на нити подвешивается необходимый груз, под действием которого штанга постоянно касается регулируемого ограничителя, обеспечивая электрическую цепь системы сигнализации, о чем свидетельствует постоянно горящий светодиод. После этого на пакет подается питание с регулируемого источника постоянного тока. В начальный момент времени ток должен быть минимальным и затем необходимо его постепенно увеличивать. При этом постоянно происходит наблюдение за шкалой амперметра и в момент погасания светодиода фиксируется значение тока.

Зная плечо, на котором действует сила, вес груза и радиус центра поверхностей полюсов магнитопровода, можно определить силу, развиваемую исполнительным элементом при данном значении тока.

На изготовленной установке был проведен ряд экспериментальных исследований [39]. Так, в частности, определена зависимость развиваемой в некоторой точке пакета силы от силы тока, протекающего через контакты пластин пакета (рисунок 4.8). Видно, что эта зависимость для данной установки практически линейна, что позволяет произвести пересчет силы для конкретного заданного тока.

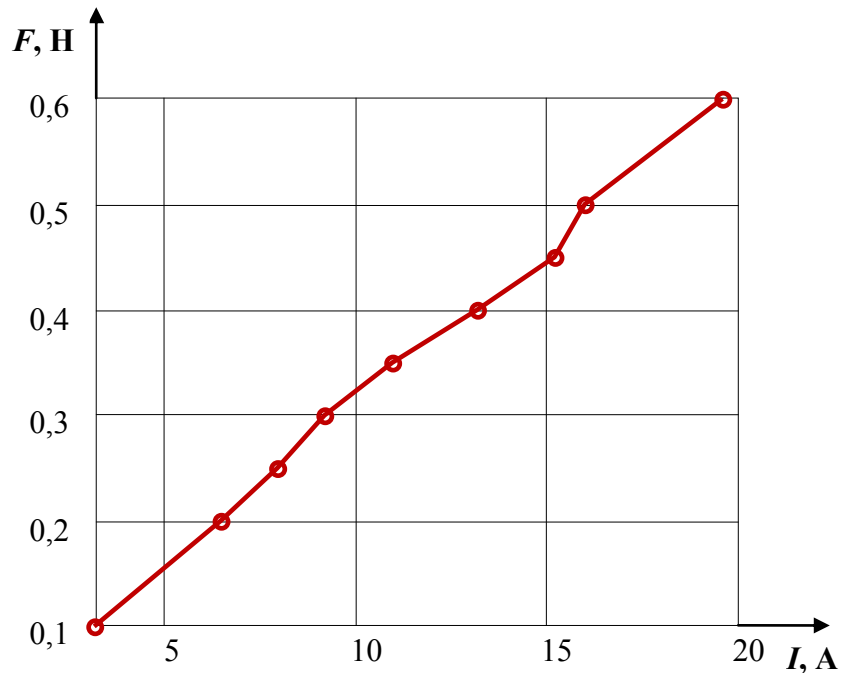


Рисунок 4.8 – Зависимость развиваемой силы от силы тока

Также был проведен эксперимент по определению зависимости силы, развиваемой исполнительным элементом, по длине пакета a . В данном случае применялся пакет из 52 пластин, величина тока достигала 16 А. При этом полученные результаты были нормированы – приведены к току в 1 А и к одной пластине (рисунок 4.9).

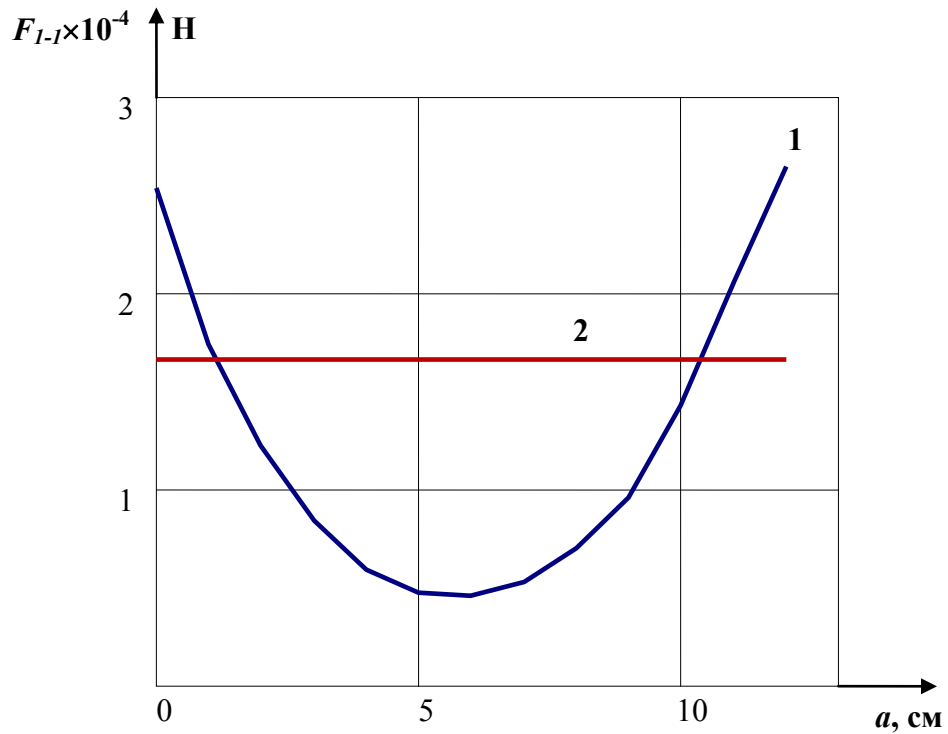


Рисунок 4.9 – Развиваемая сила по длине пакета

На последнем рисунке зависимость силы, развиваемой исполнительным элементом, показана кривой 1. Необходимо учесть, что по краям пакета сила может иметь большие значения, так как в данной конструкции в этих точках происходит уменьшение взаимного перекрытия пакета и магнитопровода, а также проявляется влияние тока, протекающего по перемычкам, соединяющим пластины пакета. Прямая 2 на этом графике представляет собой зависимость силы, которая могла быть создана единичным тонким проводником, расположенным по диагонали пакета и по которому протекает ток в 1 А.

4.3 Экспериментальная установка для исследования моментного двигателя с ленточной намоткой. Результаты эксперимента

Для проведения исследований характеристик моментного двигателя с ограниченным углом поворота [61] была разработана и изготовлена соответствующая установка, общий вид которой приведен на рисунке 4.10 [32]. В состав установки входит макетный образец моментного двигателя с устройством нагружения, источник питания и контактный датчик, позволяющий определить преодоление двигателем момента нагрузки.

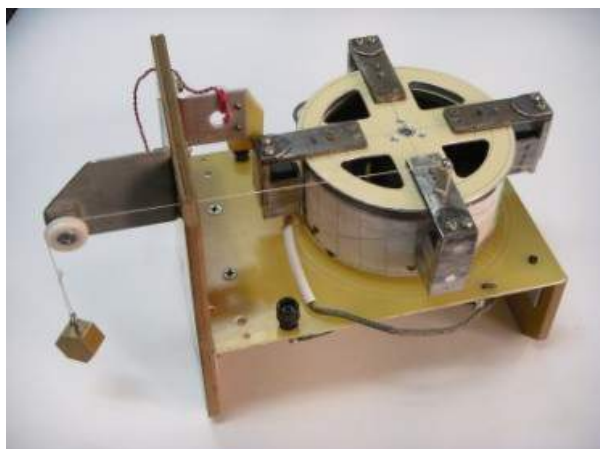


Рисунок 4.10 – Экспериментальная установка

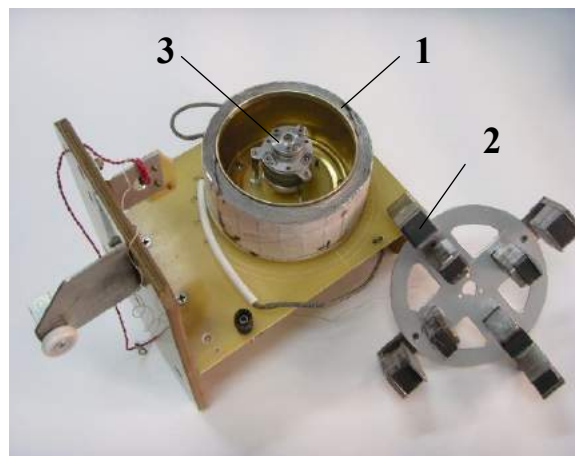
Макетный образец двигателя смонтирован на диэлектрическом основании таким образом, чтобы имелась возможность поворачивать его статор относительно ротора, который в процессе исследований должен быть установлен однозначно относительно основания; последнее связано с принципом работы контактного датчика. Для задания необходимого положения статора относительно ротора на основании нанесена шкала. После установки статора в заданное положение, он жестко фиксируется к основанию при помощи зажимных винтов. Принцип проведения исследований заключался в том, что на ленточную намотку, расположенную на статоре, подавался постоянный ток, медленно изменяющийся от нуля до величины, при которой происходит срабатывания контактного датчика, то есть преодоление двигателем момента нагрузки. Величина этого тока

фиксировалась, и в дальнейшем использовалась для определения характеристик двигателя. Ток при исследованиях не превышал 5 А.

Конструкция макетного образца двигателя приведена на рисунке 4.11.



а)



б)

Рисунок 4.11 – Конструкция макетного образца двигателя:
а) общий вид; б) основные элементы

На рисунке 4.11,а показан прием создания момента нагрузки при помощи тарированного груза, подвешенного через блок на нити, соединенной с ротором на заданном плече. Момент нагрузки создает электрический контакт между подвижной частью – ротором и основанием. Основные элементы макетного образца представлены на рисунке 4.11,б, где 1 – намотка, выполненная из алюминиевой ленты толщиной 0,07 мм, изолированной с одной стороны бумагой. Намотка проведена на тонкостенный стакан из анодированного алюминия. Всего выполнено 70 витков, в каждом из которых содержится по 4 участка, относящихся к полюсному делению. Исследования проведены при двух вариантах ленточной намотки. В первом случае в ленте намотки выполнено по 5 дополнительных боковых вырезов на каждое полюсное деление для получения равномерной характеристики момента в рабочем диапазоне взаимного положения ротора и статора. Действие таких дополнительных вырезов описано в главе 2 настоящей работы. Во втором случае намотка выполнена без дополнительных боковых вырезов. Магнитная система ротора 2 состоит из четырех пар постоянных магнитов, изготовленных на основе редкоземельных элементов. Фактический воздушный зазор выполнен величиной 20 мм. Направление векторов

магнитной индукции, имеющей в каждом случае величину 0,06 Тл, поочередно чередуется у соседних магнитов. Узел подвески ротора 3, выполненный на шарикоподшипниках, взят из серийного электропривода.

Указанный тип моментного двигателя относится к магнитоэлектрическим, имеющим линейную зависимость между моментом и током, что подтверждается результатом эксперимента, приведенным на рисунке 4.12 [21, 49]. В данном случае магниты ротора были расположены в центре элементов ленты, выделенных основными боковыми вырезами.



Рисунок 4.12 – Зависимость момента от тока

Линейная зависимость развиваемого момента от тока позволила получить характеристику распределения момента от угла взаимного положения ротора и статора при токе 1 А, протекающем по катушке. На рисунке 4.13 приведена такая характеристика, отнесенная к одному витку катушки для варианта с дополнительными боковыми вырезами. На рисунке 4.14 – та же зависимость, но для варианта без дополнительных вырезов.

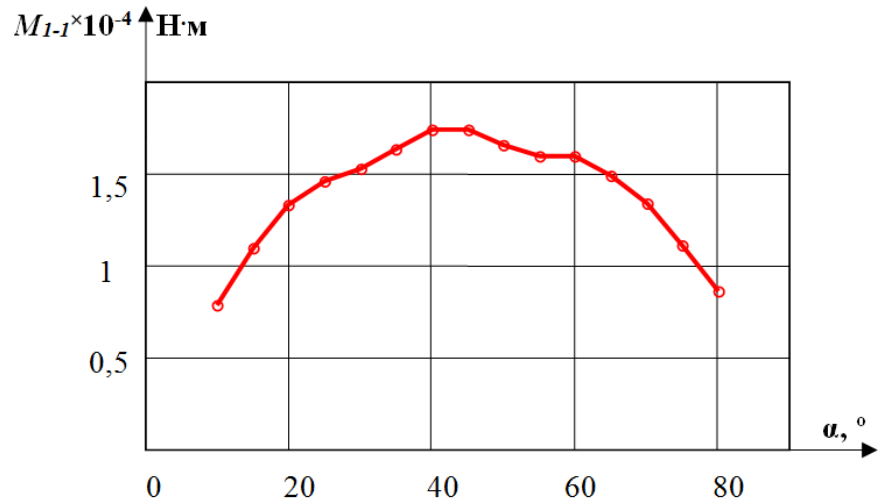


Рисунок 4.13 – Распределение момента по углу поворота для катушки с дополнительными вырезами

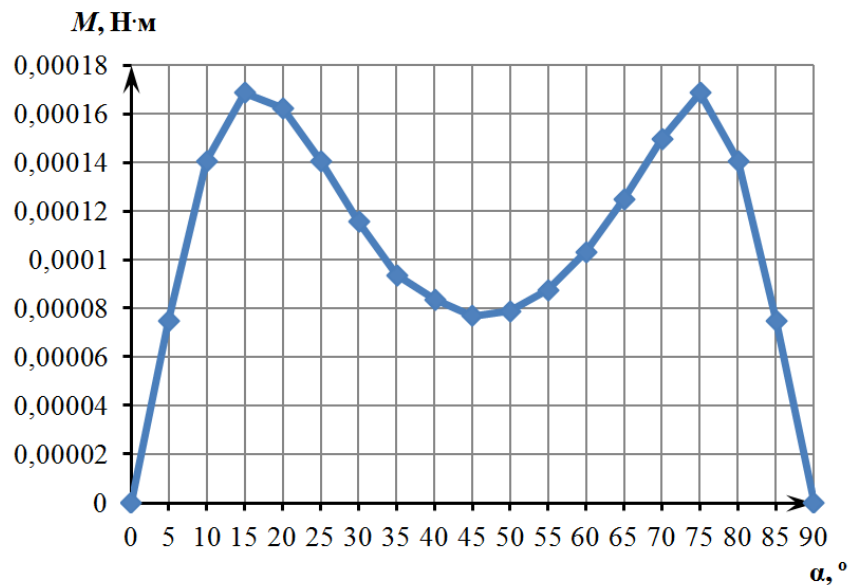


Рисунок 4.14 – Распределение момента по углу поворота

4.4 Экспериментальное исследование момента сопротивления от вихревых токов. Результаты эксперимента

Необходимость проведения эксперимента по определению момента сопротивления, вызванного действием вихревых токов в ленточной катушке, объясняется возникновением необходимости проверки результатов численных исследований, изложенных в главе 2 настоящей работы.

Для оценки величины момента сопротивления от действия вихревых токов был проведен ряд экспериментов [38, 49]. Вид экспериментальной установки приведен на рисунке 4.15.



Рисунок 4.15 – Вид экспериментальной установки

На ротор макета [21] моментного двигателя, установленного таким образом, чтобы ось вращения была горизонтальна, закреплялся груз массой m , создающий маятниковость $mg\ell$, где g – ускорение свободного падения, ℓ – смещение центра масс груза от оси вращения. На роторе монтировался источник света (лазерная указка), световое пятно которого при движении ротора перемещалось по шкале. При отклонении несбалансированного ротора от нейтральной позиции и дальнейшего его освобождения он будет совершать колебания, характер которых фиксируется записью движения по шкале светового пятна с помощью видеокамеры. Покадровый просмотр видеозаписи позволяет построить графики колебательного движения ротора. Это движение является затухающим, так как на ротор действуют два тормозящих момента, вызванных трением в шарикоподшипниковых опорах и действием вихревых токов в ленточной намотке. Конструкция макетного образца двигателя позволяет демонтировать на время из корпуса ленточную намотку и аналогичным образом провести запись колебательного движения ротора. В этом случае влияние вихревых токов

исключено и интенсивность затухания колебаний определяется только действием трения в опорах подвеса. Проведение сравнительного анализа параметров колебаний при наличии и отсутствии намотки дает возможность экспериментально определить величину момента сопротивления, вызванного действием вихревых токов.

Уравнение движения ротора с моментом инерции J имеет вид

$$J \cdot \ddot{\alpha} + \mu_{cc} \cdot \dot{\alpha} + mgl \cdot \alpha = 0,$$

где $\ddot{\alpha}$, $\dot{\alpha}$, α – угловые ускорение, скорость и угол соответственно.

Здесь $(\mu_{cc} \cdot \dot{\alpha})$ – момент скоростного сопротивления, состоящий из двух составляющих – момента трения в опорах подвеса $(\mu_{mp} \cdot \dot{\alpha})$ и момента от вихревых токов $(\mu_{em} \cdot \dot{\alpha})$. Такое представление о линейности момента скоростного сопротивления от скорости вращения основывается на достаточно неплохом совпадении с результатами экспериментальных исследований. При этом коэффициенты скоростного сопротивления определяются с использованием графика колебательного процесса [52]

$$\mu = \frac{2 \cdot J}{T} \cdot \ln \frac{A_m}{A_{m+1}},$$

где T – период колебаний; A_m , A_{m+1} – амплитуды колебаний, полученные через один период.

Так как $\mu_{cc} = \mu_{mp} + \mu_{em}$, можно определить коэффициент скоростного сопротивления от вихревых токов

$$\mu_{em} = \mu_{cc} - \mu_{mp},$$

где μ_{cc} и μ_{mp} определяются из графиков колебаний ротора с наличием и отсутствием ленточной намотки, пример которых приведен на рисунке 4.16.

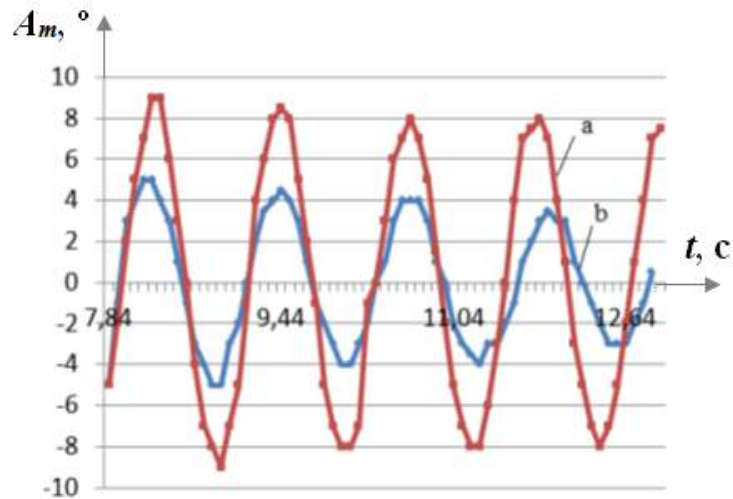


Рисунок 4.16 – Графики колебания с отсутствием катушки (а) и при ее наличии (б)

Проведенные расчеты показали, что величина коэффициента момента сопротивления от действия вихревых токов находится в диапазоне $\mu_{em} = (2,38 \text{ } 7,85) \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$. Выполненные ранее аналитические исследования данной задачи в главе 2 настоящей работы, показывают, что крутизна характеристики момента торможения от скорости вращения, рассчитанная аналитически, лежит внутри диапазона, полученного экспериментально.

4.5 Сопротивление пластины

Результаты численного исследования зависимости сопротивления пластины от соотношения ее длины и ширины были подтверждены экспериментально. Вид экспериментальной установки приведен на рисунке 4.17. Зависимость сопротивления пластины от ее длины, приведенная на рисунке 4.18, показывает, что в данном случае также наблюдается минимальное значение сопротивления при определенном соотношении длины и ширины пластины.



Рисунок 4.17 – Вид экспериментальной установки для определения сопротивления единичной пластины

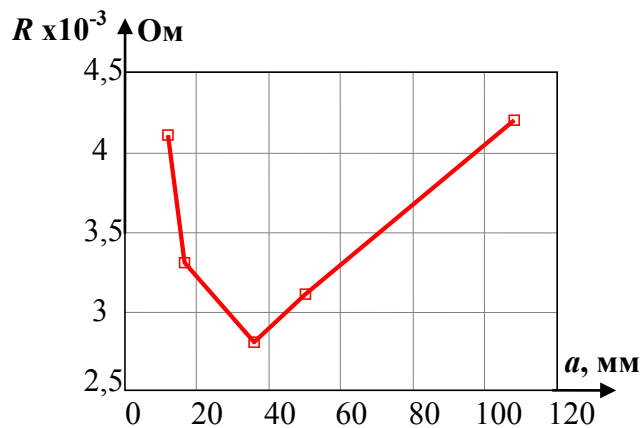


Рисунок 4.18 – Полученная экспериментально зависимость сопротивления пластины от ее длины

Полученные результаты показывают, что минимальное значение сопротивления наблюдается при соотношении длины и ширины пластины $\beta=0,7$ для варианта относительной ширины контакта $\beta_k=0,2$. Данные результаты совпадают с полученными ранее аналитически в главе 2 настоящей работы.

Выводы к главе 4

1. Проведены экспериментальные исследования теплостойкости пластины, показывающие, что ленточная намотка, при наличии хорошего отвода тепла на корпус моментного двигателя будет являться вполне работоспособным элементом конструкции, выдерживающим большие токи.

2. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования характеристик моментного двигателя с пакетным элементом. Результаты эксперимента достаточно близки к полученным в главе 2 настоящей работы данным аналитических исследований.

3. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования характеристик моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора. Проведенные на установке эксперименты позволили получить характеристики "момент-угол поворота ротора" для ленточной намотки с дополнительными боковыми вырезами и без них. Результаты близки к полученным аналитически в главе 3 настоящей работы.

4. Экспериментально определен диапазон коэффициента момента сопротивления, вызванного действием вихревых токов. Полученные данные близки результатам аналитических исследований, выполненных в главе 3 настоящей работы.

5. Экспериментально подтверждены результаты численного исследования сопротивления пластины, а именно, наличие минимума сопротивления при определенном соотношении длины пластины и ее ширины.

Заключение

В результате теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в диссертационной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Предложен и обоснован новый тип обмотки якоря электромеханического преобразователя – ленточная обмотка (намотка) с боковыми вырезами, которая позволяет усилить теплоотвод, обеспечить бóльшую токовую нагрузку и повысить развиваемый двигателем момент более, чем в 2,5 раза по сравнению с серийно выпускаемыми двигателями.
2. Разработана конечно-элементная модель электромеханического преобразователя с ленточной обмоткой якоря, позволяющая определить и исследовать зависимости момента от угла поворота ротора, с учетом действия тока ленточной обмотки (реакции якоря).
3. Установлены зависимости геометрических параметров ленточной обмотки якоря электромеханического преобразователя, а именно соотношение длины пластины (полюсного деления) и ее ширины 0,68–0,72, обеспечивающее максимальный развиваемый момент двигателя.
4. Результаты экспериментальных исследований электромеханического преобразователя с ленточной обмоткой якоря подтверждают адекватность предложенных математической модели и расчетных зависимостей.
5. Показана возможность формирования необходимой функциональной зависимости силовой характеристики пластины ленточной намотки двигателя путем выполнения дополнительных боковых вырезов в пластине.
6. Предложены варианты однофазного моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора и двухфазного вентильного двигателя с неограниченным угловым рабочим диапазоном и минимальными пульсациями момента при повороте ротора.

Список используемой литературы

1. Адволоткин, Н. П. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока / Н. П. Адволоткин [и др.] – Л. : Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние, 1984.–160 с.
2. Бартос, Ф. Дж. Высокомоментные бесколлекторные двигатели с постоянными магнитами / Ф. Дж. Бартос // Control Engineering Россия. – 2007. – Октябрь.
3. Батоврин, С. А. Датчики положения ротора и синхронные тахогенераторы для бесконтактного моментного привода / С. А. Батоврин, Л. М. Епифанова, А. Г. Микеров и др. // Электротехника. – 1991. – №8. – С. 52 – 55.
4. Беленький, Ю. М. Бесконтактный моментный привод для замкнутых систем автоматического управления / Ю. М. Беленький, Л. М. Епифанова, А. Г. Микеров и др. // Электротехника. – 1986. – №2. – С. 12-14.
5. Беленький, Ю. М. Выбор и программирование параметров бесконтактного моментного привода / Ю. М. Беленький, А. Г. Микеров. – Л. : Знание, 1990. – 23 с.
6. Беленький, Ю. М. Опыт разработки и применения бесконтактного моментного привода / Ю. М. Беленький, Г. С. Зеленков, А. Г. Микеров. – Л. : Знание, 1987. – 28 с.
7. Беленький, Ю. М. Проектирование исполнительного электродвигателя для многофункциональных систем автоматического управления / Ю. М. Беленький, Г. С. Зеленков, А. Г. Микеров // Электротехника. – 1988. – №8. – С. 16-18.
8. Беляков, П. Ю. Теоретический анализ диагональной обмотки / П. Ю. Беляков, Ю. В. Писаревский, Л. Н. Титова // Электротехника. – 2000. – №8. – С. 24-26.
9. Бесконтактные моментные электродвигатели ДБМ. Справочник. – М. : ПП "Чертановская типография" Мосгорпечать, 1992.

10. Ваганов, М. А. Магнитная индукция в воздушном зазоре вентильного двигателя / М. А. Ваганов, А. А. Гарчук // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". – 2016. – №8. – С. 66-72.
11. Вентильный двигатель : пат. 2454776 Рос. Федерация : МПК H02K 29/06 / В. М. Мартемьянов, А. Г. Иванова (Долгих) ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – №2011100190/07 ; заявл. 11.01.2011 ; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18. – 12 с.
12. Владимиров, В. С. Что такое математическая физика? / В. С. Владимиров – Препринт, Математический институт им. В. А. Стеклова РАН. – М.: МИАН, 2006. – 20 с.
13. Волков, Н. И. Электромашинные устройства автоматики / Н. И. Волков, В. П. Миловзоров. – М. : Высшая школа, 1986.–335 с.
14. Волокитина, Е. В. Новые моментные вентильные электродвигатели для прецизионных электроприводов технологических роботов и металлообрабатывающего оборудования / Е. В. Волокитина, А. И. Власов, Ю. Г. Опалев // Электроника и электрооборудование транспорта – 2011. – № 4. – С. 32-35.
15. Гаврилов, С. В. Управление электроприводом на основе бесколлекторного двигателя с постоянными магнитами / С. В. Гаврилов, Д. Т. Занг, Н. Д. Тхань // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". – 2016. – №8. – С. 53-62.
16. ГОСТ 1173-2006 Фольга, ленты, листы и плиты медные. Технические условия. – М. : Стандартиформ, 2007. – 22 с.
17. ГОСТ 5638-75 Фольга медная рулонная для технических целей. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1994. – 9 с.
18. Двайт, Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М : Наука, 1973.–228 с.
19. Демагин, А. В. Электрические машины для непосредственного привода приборных систем / А. В. Демагин. – СПб. : Научн.-произв. объединение «Азимут», 1991. –81 с.

20. Долгих, А. Г. Активный ленточный элемент моментного электродвигателя / А. Г. Долгих, В. М. Мартемьянов, В. Н. Бороков // Сборник трудов Межд. науч.-техн. конф. «Завалишинские чтения – 2017» / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. – Санкт-Петербург, 2017. – в печати.
21. Екимова, О. Ю. Экспериментальные исследования моментного двигателя с ленточной намоткой / О. Ю. Екимова, А. Г. Иванова (Долгих), К. А. Татарникова // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всерос. науч. конф. мол. уч. в 6-ти частях. Часть 2, 2-3 дек. 2011 г., г. Новосибирск / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – С. 104-106.
22. Епифанова, Л. М. Новый ряд моментных двигателей для экстремальных условий применения / Л. М. Епифанова, О. В. Епифанов, А. Г. Микеров // Экстремальная робототехника ЭР-2012: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Спб. : изд-во "Политехника-сервис", 2012. – С. 1-7.
23. Епифанова, Л. М. Создание новой серии моментных двигателей интенсивного использования для бесконтактного моментного привода / Л. М. Епифанова, Д. А. Любшин, А. И. Якушенко и др. // Сборник материалов V Межд. (XVI Всерос.) науч. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2007, 18-21 сентября 2007 г., г. Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 240-243.
24. Завод Магнетон [Электронный ресурс]. – URL: http://www.magneton.ru/index_ru.html (30.04.2017).
25. Зыль, К. А. Исследование магнитных полей моментного двигателя с ленточной намоткой / К. А. Зыль, А. Г. Иванова (Долгих) // Современные техника и технологии: сборник докладов XX Межд. юбилейной науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. уч. в 3 т. Т. 1, 14-18 апр. 2014 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 229-230.

26. Иванова (Долгих), А. Г. Двигатель-маховик в импульсном режиме / А. Г. Иванова (Долгих), Р. Э. Кодермятов, И. Н. Самодуров // Космическое приборостроение: сб. науч. труд. II Всерос. форума школьников, студ., асп. и мол. уч. с межд. уч. «Космическое приборостроение», 10-12 апр. 2014 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 91-93.
27. Иванова (Долгих), А.Г. Влияние геометрии пластины на силовую характеристику двигателя с активным пакетным элементом / А. Г. Иванова (Долгих), В. М. Мартемьянов, И. В. Плотникова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 4. – С. 22-26.
28. Иванова (Долгих), А. Г. Влияние размеров электрода ленточной намотки на характеристики моментного двигателя / А. Г. Иванова (Долгих), В. М. Мартемьянов, О. Ю. Стахеева // Контроль. Диагностика. – 2014. – №13. – С. 26-28.
29. Иванова (Долгих), А. Г. Исследования температурных режимов ленточной намотки моментного двигателя [Электронный ресурс] : статья / А. Г. Иванова (Долгих), Р. Э. Кодермятов, В. М. Мартемьянов // Вестник науки Сибири. – 2015. – № 0(15). – С. 123-131. – URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/1209/843> (05.03.2017).
30. Иванова (Долгих), А. Г. Линейный двигатель с активным пакетным элементом / А. Г. Иванова (Долгих), В. М. Мартемьянов, И. А. Плотников // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2010. – № 11. – С. 36-39.
31. Иванова (Долгих), А. Г. Магнитное поле прямоугольного проводника с током [Электронный ресурс] : статья / А. Г. Иванова (Долгих), И. Н. Самодуров, В. М. Мартемьянов // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 6. – URL: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=14265> (04.02.2017).
32. Иванова (Долгих), А. Г. Моментный двигатель с ленточной намоткой / А. Г. Иванова (Долгих) // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всерос.

- науч. конф. мол. уч. в 6-ти частях. Часть 2, 2-3 дек. 2011 г., г. Новосибирск / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – С. 113-115.
33. Иванова (Долгих), А. Г. Моментный двигатель с ленточной намоткой при импульсном включении / А. Г. Иванова (Долгих), Р. Э. Кодермятов, В. М. Мартемьянов // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов, 14-15 февраля 2013 г., г. Томск / АО «НПЦ «Полюс». – Томск, 2013. – С.131-133.
34. Иванова (Долгих), А. Г. Определение момента сопротивления от вихревых токов с помощью программного продукта Agros2D / А. Г. Иванова (Долгих) // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всерос. науч. конф. мол. уч. в 11-ти частях. Часть 6, 2-6 дек. 2014 г., г. Новосибирск / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 55-58.
35. Иванова (Долгих), А. Г. Применение исполнительных устройств с пакетным элементом в системах автоматики / А. Г. Иванова (Долгих), В. М. Мартемьянов, К. А. Татарникова, О. Ю. Екимова // Контроль. Диагностика. – 2012. – №13. – С. 173-178.
36. Иванова (Долгих), А. Г. Силовая характеристика линейного двигателя с активным пакетным элементом / А. Г. Иванова (Долгих), В. М. Мартемьянов, Т. Г. Нестеренко и др. // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2011. – № 7. – С. 19-21.
37. Иванова (Долгих), А. Г. Технологические приемы изготовления ленточной намотки моментного двигателя [Электронный ресурс] : статья / А. Г. Иванова (Долгих), В. М. Мартемьянов // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 1. – URL: <http://www.eduherald.ru/122-11964> (04.02.2017).
38. Иванова (Долгих), А. Г. Тормозной момент от вихревых токов / А. Г. Иванова (Долгих), Р. Э. Кодермятов, И. Н. Самодуров // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всерос. науч. конф. мол. уч. в 11-ти частях. Часть 6,

- 2-6 дек. 2014 г., г. Новосибирск / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 58-62.
39. Иванова (Долгих), А. Г. Характеристики активного элемента моментного электродвигателя / А. Г. Иванова (Долгих) // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Межд. науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. уч. в 3 т. Т. 1, 9-13 апр. 2012 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 361-362.
40. Иванова (Долгих), А. Г. Экспериментальная установка для исследования исполнительного устройства с пакетным элементом / А. Г. Иванова (Долгих) // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Межд. науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. уч.. В 3 т. Т. 1, 12-16 апр. 2010 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 427-428.
41. Иванова (Долгих), А. Г. Экспериментальное определение температурных характеристик пакетного элемента / А. Г. Иванова (Долгих), Е. М. Дмитриева // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Межд. науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. уч. в 3 т. Т. 1, 12-16 апр. 2010 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 413-414.
42. Иванова (Долгих), А. Г. Numerical modeling of physical problems with using of Agros2D / А. Г. Иванова (Долгих) // Космическое приборостроение: сб. науч. труд. II Всерос. форума школьников, студ., асп. и мол. уч. с межд. уч. «Космическое приборостроение», 10-12 апр. 2014 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 341-343.
43. Изотов, В. А. Беспазовые машины постоянного тока: состояние и перспективы развития / В. А. Изотов, В. В. Фетисов // Электротехника. – 1997. – №6. – С. 1-5.

44. Инженерный справочник [Электронный ресурс]. – URL: <http://for-engineer.info/> (23.07.2017).
45. Капралов, С. Моментный электропривод для прецизионных следящих систем / С. Капралов, Матвеев, В. Майоров и др. // Современная электроника. –2008. – № 5. – С. 26-28.
46. Каталог. Моментные электродвигатели и индукционные датчики угла для прецизионных электроприводов и цифровых безредукторных следящих систем – ФГУП ЦНИИ "Электроприбор", 2005.–75 с.
47. Кенио, Т. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами: Пер. с англ. / Т. Кенио, С. Нагамори. – М. : Энергоатомиздат, 1989.–184 с.
48. Кодермятов, Р. Э. Аналитическое исследование движения ротора моментного двигателя при импульсном питании / Р. Э. Кодермятов, И. Н. Самодуров, А. Г. Иванова (Долгих) // Современные техника и технологии: сборник докладов XX Межд. юбилейной науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. уч. в 3 т. Т. 1, 14-18 апр. 2014 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 263-264.
49. Кодермятов, Р. Э. Экспериментальное определение характеристик двигателя с ленточной намоткой статора / Р. Э. Кодермятов, И. Н. Самодуров, А. Г. Иванова (Долгих) // Современные техника и технологии: сборник докладов XX Межд. юбилейной науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. уч. в 3 т. Т. 1, 14-18 апр. 2014 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 239-240.
50. Комисар М. И. Электрические машины гироскопических систем: учебное пособие / М. И. Комисар – М. : Оборонгиз, 1963.–285 с.
51. Красников, Г. Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: Учебное пособие / Г. Е. Красников, О. В. Нагорнов, Н. В. Старостин. – М. : НИЯУ МИФИ, 2012.–184 с.
52. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М. : Мир, 1982 – 520 с.

53. Магнитное поле прямоугольного провода с током [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ntmdt.ru/spm-basics/view/magnetic-field-rectangular-wire> (12.03.2017).
54. Мартемьянов, В. М. Активный элемент моментного двигателя / В. М. Мартемьянов, А. Г. Иванова (Долгих) // Контроль. Диагностика. – 2011. – специальный выпуск. – С. 109-111.
55. Машиноаппарат. Разработка и производство электродвигателей ДБМ [Электронный ресурс]. – URL: <http://mashap.maverick.ru/MenuVert/About1.html> (23.04.2017).
56. Мизонов, В. Е. Уравнения математической физики: курс лекций / В. Е. Мизонов – Иваново, 2001.–57 с.
57. Микеров, А. Г. Выбор моментного двигателя прямого и редукторного электроприводов / А. Г. Микеров // Control Engineering Россия. – 2012. – № 3(40). – С. 14-19.
58. Микеров, А. Г. Прямой привод в России / А. Г. Микеров // Control Engineering Россия. – 2012. – № 1(38). – С. 8-11.
59. Микеров, А. Г. Выбор моментных двигателей систем автоматического управления по их энергетическим и динамическим показателям / А. Г. Микеров, Е. А. Рубцова // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2010. – №6. – С. 58-69.
60. Моментный двигатель : пат. 2378755 Рос. Федерация : МПК H02K 26/00 / В. М. Мартемьянов, И. А. Плотников, Е. Н. Горячок, А. В. Квадяева ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – №2008147477/09 ; заявл. 01.12.2008 ; опубл. 10.01.2010, Бюл. № 1. – 8 с.
61. Моментный двигатель : пат. 2441310 Рос. Федерация : МПК H02K 26/00 / В. М. Мартемьянов, А. Г. Иванова (Долгих) ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – №2010135113/07 ; заявл. 20.08.2010 ; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3. – 6 с.
62. Никитин Е. А. Гирскопические системы, ч. III. Элементы гирскопических приборов. Под ред. Д. С. Пельпора. Учеб. пособие для

- вузов по специальности "Гироскопические приборы и устройства" / Е. А. Никитин, С. А. Шестов, В. А. Матвеев – М. : Высшая школа, 1972.–472 с.
63. Овсянников, В. Н. Моментный двигатель с ограниченным углом поворота ротора : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / В. Н. Овсянников. – Самара, 2014. – 180 с.
64. Писаревский, Ю. В. Особенности оценки эффективности обмоток для беспазовых якорей бесконтактных двигателей постоянного тока / Ю. В. Писаревский, Ж. А. Ген // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 6-10.
65. Самодуров, И. Н. Исследование тепловых режимов пакетного элемента как части ленточной намотки моментного двигателя / И. Н. Самодуров, А. Г. Долгих // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. трудов в 9-ти частях. Часть 5, 1-5 дек. 2015 г., г. Новосибирск / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – С. 62-64.
66. Системы изоляции для низковольтных двигателей и генераторов [Электронный ресурс]. – URL: http://www.vonroll.com/userfiles/downloads/1454583371272378/LOW_VOLTAGE_RU_20110211.pdf (15.04.2017).
67. Стахеева, О. Ю. Аналитические исследования влияния геометрии пластины на характеристики двигателя с ленточным элементом / О. Ю. Стахеева, А. Г. Иванова (Долгих) // Современные техника и технологии: сборник докладов XX Межд. юбилейной науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. уч. в 3 т. Т. 1, 14-18 апр. 2014 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 273-274.
68. Стахеева, О. Ю. Оценка влияния длины электрода на нормальную составляющую тока пластинчатого элемента / О. Ю. Стахеева, Е. В. Стахеев // Сб. науч. трудов II Всерос. форума школьников, студю, асп. и мол. уч. с межд. уч. «Космическое приборостроение», 10-12 апр. 2014 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 269-271.

69. Столов, Л. И. Авиационные моментные двигатели / Л. И. Столов [и др.] – М. : Машиностроение, 1979.–136 с.
70. Столов, Л. И. Моментные двигатели постоянного тока / Л. И. Столов, А. Ю. Афанасьев. – М. : Энергоатомиздат, 1989.–224 с.
71. Столов, Л. И. Моментные двигатели с постоянными магнитами / Л. И. Столов, Б. Н. Зыков. – М. : Энергия, 1977.–112 с.
72. Тамм, И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.–504 с.
73. Татарникова, К. А. Влияние геометрии пластин на вид силовой характеристики двигателя / К. А. Татарникова, О. Ю. Екимова // Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Межд. науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. уч. в 3 т. Т. 1, 9-13 апр. 2012 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 393-395.
74. Татарникова, К. А. Выбор приемов сглаживания силовой характеристики двигателя / К. А. Татарникова, О. Ю. Екимова. // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов II Всерос. науч.-практ. конф. студ., асп. и мол. уч. «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», в 2 т. Т. 2, 28 мая – 1 июня 2012 г., г. Томск / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 74-77.
75. Титова, Л. Н. Исследование малоинерционного электродвигателя постоянного тока с высокими технологическими характеристиками : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Л. Н. Титова. – Воронеж, 2001. – 151 с.
76. Токарев, Б. Ф., Волков, Б. С. Расчет основных размеров тихоходных моментных электродвигателей постоянного тока встраиваемой конструкции с магнитоэлектрическим возбуждением / Б. Ф. Токарев, Б. С. Волков // Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины. –1982. – Вып. 4 (134).

77. Штелтинг, Г. Электрические микромашины / Г. Штелтинг, А. Байссе ; пер. с нем. В. А. Алешечкина ; под ред. А. Н. Ледовского. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 229 с.
78. Agros2D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.agros2d.org/> (20.04.2017).
79. Chau, K. T. Overview of permanent-magnet brushless drives for electrical and hybrid electric vehicles / K. T. Chau, C. C. Chan, C. Liu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55(6). – P. 2246-2257.
80. Cho, K.-H. Coupled electro-magneto-thermal model for induction heating process of a moving billet / K.-H. Cho // International Journal of Thermal Sciences. – 2012. – Vol. 60. – P. 195-204.
81. COMSOL AC/DC Module User's Guide / Version: April 2010 COMSOL 4.0, p. 234.
82. Crowder, R. Electric Drives and Electromechanical Systems: Applications and Control, 1st ed. / R. Crowder – Elsevier, 2006.–312 p.
83. Dolgih, A. G. Active element influence on the motor's torque / A. G. Dolgih, V. M. Martemyanov, V. N. Borikov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 113. – Article number 01013, DOI: 10.1051/matecconf/201711301013.
84. Dolgih, A. G. Analytical studies of torque motor tape active element / A. G. Dolgih, V. M. Martemyanov, I. N. Samodurov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 48. – Article number 01004, DOI: 10.1051/confmatec/20164801004.
85. Dolgih, A. G. Parameters of the torque motor tape winding / A. G. Dolgih, V. M. Martemyanov // Proceedings of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – May 12-14, 2016, Moscow, Russia. – pp. 1-4.
86. Dolgih, A. G. The tape winding current impact on the motor's torque curve / A. G. Dolgih, V. M. Martemyanov, I. N. Samodurov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 102. – Article number 01014, DOI: 10.1051/matecconf/201710201014.

87. Dubrovskiy, G. General comparison of direct and geared drives for control applications / G. Dubrovskiy, A. Mikerov, V. Dzhankhotov, J. Pyrhonen // 16th European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe). – Aug. 26-28, 2014, Lappeenranta, Finland. – Article number 6910754, DOI: 10.1109/EPE.2014.6910754.
88. Faulhaber. Technical information, 8th ed. – Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2016. – 71 p.
89. Gieras, J. F. Permanent magnet motor technology: design and applications, 3rd ed. / J. F. Gieras – CRC Press : Taylor & Francis Group, 2010.–600 p.
90. Hanselman, D. Brushless Permanent Magnet Motor Design, 2nd ed. / D. Hanselman – Magna Physics Publishing, 2006.–392 p.
91. Hendershot, J. R. Design of brushless permanent magnet motors / J. R. Hendershot, T. J. E. Miller – Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994.–822 p.
92. Hughes, A. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications, 4th ed. / A. Hughes B. Drury – Elsevier, 2013.–436 p.
93. IDAM. INA – Drives & Mechatronics. – INA – Drives & Mechatronics GmbH & Co. KG, 2014. – 15 p.
94. Karban, P. Modeling of rotational induction heating of nonmagnetic cylindrical billets / P. Karban, F. Mach, I. Doležel // Applied Mathematics and Computation. – 2013. – Vol. 219, Issue 13. – P. 7170-7180.
95. Karban, P. Numerical solution of coupled problems using code Agros2D / P. Karban, F. Mach, P. Kus and other // Computing. – 2013. – Vol. 95, Suppl. 1 – P. 381-408, DOI 10.1007/s00607-013-0294-4.
96. Mach, F. Induction heating of cylindrical nonmagnetic ingots by rotation in static magnetic field generated by permanent magnets / F. Mach, P. Karban, I. Doležel // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2012. – Vol. 236. – P. 4732-4744.
97. Mach, F. Finite-Element 2-D Model of Induction Heating of Rotating Billets in System of Permanent Magnets and its Experimental Verification / F. Mach, V.

- Štarman, P. Karban, and other // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 61, No. 5. – P. 2584-2591.
98. Mikerov, A. G. General comparison of direct and geared drives for control applications / A. G. Mikerov, J. J. Pyrhönen, J.J. Vauterin // The International Conference on Computer as a Tool EUROCON 2007. – Sept. 9-12, 2007, Warsaw, Poland. – Article number 4400568, DOI: 10.1109/EURCON.2007.4400568.
99. Torque Motors. – ETEL Motion Technology, 2017. – 15 p.
100. Zhu, L. Analytical methods for minimizing cogging torque in permanent-magnet machines / L. Zhu, S. Z. Jiang, Z. Q. Zhu, C. C. Chan // IEEE Transactions on Magnetics. – 2009. – Vol. 45(4). – P. 2023-2031.
101. Zhu, Z. Q. Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines / Z. Q. Zhu, D. Howe // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2000. – Vol. 15. – P. 407-412.
102. Zig-zag windings, winding machine, and method : пат. 4331896 A US / D. Sedgewick ; заявитель и патентообладатель Sedgewick Richard D. – № US 06/198,928 (1982); заявл. 20.10.1980; опубл. 25.05.1982. – 18 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патенты на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2441310

МОМЕНТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010135113

Приоритет изобретения 20 августа 2010 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 января 2012 г.

Срок действия патента истекает 20 августа 2030 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU**⁽¹¹⁾ **2 441 310**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
H02K 26/00 (2006.01)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2010135113/07, 20.08.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.08.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 20.08.2010

(45) Опубликовано: 27.01.2012 Бюл. № 3

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: СТОЛОВ Б.Н. И ДР. Авиационные
моментные двигатели. - М.:
Машиностроение, 1979, с.14. SU 1483559 A1,
30.05.1989. SU 1220065 A1, 23.03.1986. RU
2340068 C1, 27.11.2008. DE 2035027 C3,
14.02.1980. EP 0186501 B1, 02.05.1991.

Адрес для переписки:

634050, г.Томск, пр. Ленина, 30,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, отдел
правовой охраны результатов
интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

Мартемьянов Владимир Михайлович (RU),
Иванова Антонина Геннадьевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

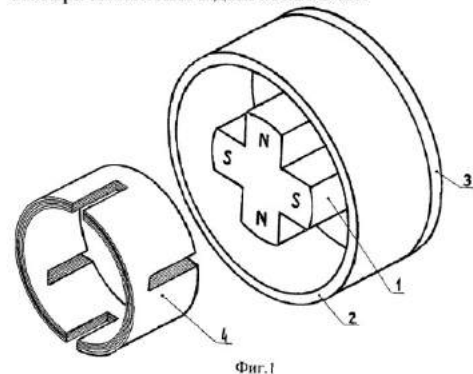
Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования "Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет" (RU)

(54) МОМЕНТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники, в частности к моментным магнитоэлектрическим двигателям, и может быть использовано для создания момента в различных системах коррекции и программного разворота. Моментный двигатель содержит магнитную систему, состоящую из многополюсного постоянного магнита и магнитопровода, а также активный элемент в виде спирально намотанной электропроводящей ленты, покрытой слоем изоляционного материала. На боковых краях ленты поочередно с одного и другого края выполнены узкие поперечные вырезы. Эти вырезы на каждом витке намотки ленты находятся над и под аналогичными вырезами на нижележащем и вышележащем слоях. Эти вырезы создают на витке активном элементе боковые пазы, причем расстояние между

смежными пазами соответствует полюсному делению магнита. К концам намотанной ленты подключен источник постоянного тока. Технический результат - расширение рабочего диапазона углов взаимного поворота ротора и статора моментного двигателя. 3 ил.



Фиг.1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2454776

ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Патентообладатель(ли): *Государственное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011100190

Приоритет изобретения **11 января 2011 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **27 июня 2012 г.**

Срок действия патента истекает **11 января 2031 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU**⁽¹¹⁾ **2 454 776**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
H02K 29/06 (2006.01)
H02K 1/06 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011100190/07, 11.01.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.01.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 11.01.2011

(45) Опубликовано: 27.06.2012 Бюл. № 18

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: АДВОЛЮТКИН Н.П. и др. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока. - Л.: Энергоатомиздат, 1984, с.142. RU 2408127 C1, 27.11.2010. RU 2004119871 A1, 10.01.2006. RU 2141159 C1, 10.11.1999. EP 1003270 A1, 24.05.2000. GB 2083955 A, 31.03.1982. ЮФЕРОВ Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. - М.: Высшая школа, 1988, с.200-203, 212-214, 308-311.

Адрес для переписки:

634050, г.Томск, пр. Ленина, 30, ГОУ ВПО
"Национальный исследовательский Томский
политехнический университет", отдел
правовой охраны результатов
интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

Мартемьянов Владимир Михайлович (RU),
Иванова Антонина Геннадьевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное учреждение высшего
профессионального образования
"Национальный исследовательский Томский
политехнический университет" (RU)

RU 2 4 5 4 7 7 6 C 1

RU 2 4 5 4 7 7 6 C 1

(54) ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники, в частности к вентильным электродвигателям, и может быть использовано в различных электроприводах, в том числе в качестве гидродвигателя. Технический результат достигается следующим образом. Активный элемент представляет собой двухсекционную катушку из изолированной токопроводящей ленты, на которой выполнены узкие поперечные вырезы, чередующиеся с одного и другого боковых краев ленты и образующие при намотке ленты

пазы в торцах секций. Паза двух секций сдвинуты на половину полюсного деления магнита ротора. Начало и конец ленты каждой секции подсоединены к коммутаторам, которые управляются сигналами датчика положения ротора. Намотка расположена в зазоре между магнитом ротора и магнитопроводом и монтируется непосредственно на корпусе двигателя, обеспечивая лучший теплоотвод. Технический результат - повышение момента двигателя за счет пропуска тока по активному элементу больших токов. 7 ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты внедрения результатов диссертационной работы



"УТВЕРЖДАЮ"

Главный конструктор

АО «НПП «Полус»

И.В. Балус

" 20 " 09 2017г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации

Долгих Антонины Геннадьевны

Комиссия в составе:

Председатель: Тверяков О.В. - заместитель главного конструктора, к.т.н.

Члены комиссии: Цехмestрюк Г.С. – начальник отдела;

Коков Е.Г. – начальник лаборатории.

Составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Долгих А. Г. "Электромеханический преобразователь с ленточной обмоткой якоря" на соискание ученой степени кандидата технических наук используются на АО "НПП "Полус".

Результаты исследования были использованы при разработке и проектировании моментных двигателей, а именно:

- расчет магнитных цепей моментных двигателей на основе высококоэрцитивных редкоземельных магнитов численными методами.
- предложенная методика оценки влияния магнитного поля якоря на основной магнитный поток моментного двигателя.

Председатель комиссии

О.В. Тверяков

Члены комиссии

Г.С. Цехмestрюк

Е.Г. Коков



"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор

по образовательной деятельности

ФГАОУ ВО НИ ТПУ

Ю. С. Боровиков

"15" 09 2017 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс результатов кандидатской диссертации
Долгих Антонины Геннадьевны

Комиссия в составе: председателя – начальника отдела магистратуры ТПУ, к.т.н. С. В. Силушкина, доцента кафедры физических методов и приборов контроля качества ИНК ТПУ, к.т.н. И. В. Плотниковой, доцента кафедры точного приборостроения ИНК ТПУ, к.т.н. В. С. Ивановой составила настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы А. Г. Долгих "Электромеханический преобразователь с ленточной обмоткой якоря", а именно:

- методика определения тормозного момента от действия вихревых токов в ленточной намотке двигателя;
- методика расчета ленточного активного элемента моментного двигателя;
- методика определения температурных характеристик ленточного активного элемента;

использованы:

- Для постановки лабораторных и практических занятий по дисциплине "Электрические машины в приборостроении" направления подготовки 12.03.01 "Приборостроение" и дисциплины "Электронные и электромеханические устройства" направления подготовки 11.03.04 "Электроника и нанoeлектроника".
- При выполнении выпускных квалификационных работ студентов по направлению подготовки 12.03.01 "Приборостроение".
- При выполнении НИРС студентов кафедры точного приборостроения ТПУ. Результаты работ неоднократно поощрялись дипломами конференций.

Председатель комиссии

С. В. Силушкин

Члены комиссии

И. В. Плотникова

В. С. Иванова



"УТВЕРЖДАЮ"
 Проректор
 по научной работе и инновациям
 ФГАОУ ВО НИ ТПУ
 С. А. Байдали
 "18" 09 2017 г.

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Долгих Антонины Геннадьевны на тему "Электромеханический преобразователь с ленточной обмоткой якоря" в научные работы, проводимые в рамках гранта РФФИ

Комиссия в составе: председателя – заместителя директора по развитию ИНК ТПУ, д.т.н. И. Б. Степанова, начальника научного отдела ИНК ТПУ, к.т.н. А. Ю. Дёмина, профессора кафедры точного приборостроения ИНК ТПУ, д.т.н. В. С. Дмитриева, составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Долгих А. Г.:


- аналитические исследования электрических характеристик ленточного активного элемента при помощи COMSOL Multiphysics;
- аналитические исследования магнитных характеристик моментного двигателя с ленточным активным элементом при помощи COMSOL Multiphysics;
- разработанный и изготовленный макет моментного двигателя с ленточным активным элементом с учетом предложенных технологических подходов к изготовлению активного элемента;
- численные исследования температурных характеристик ленточного активного элемента;
- методика определения влияния реакции тока активного элемента на магнитный поток двигателя;

использованы при выполнении работ по гранту РФФИ № 14-0831068 мол_а в 2014-2015 гг. "Разработка ленточного моментного двигателя и исследование его электрических и магнитных характеристик". Указанные результаты включены в отчеты по выполненному гранту РФФИ № 14-0831068 мол_а.

Председатель комиссии

 И. Б. Степанов

Члены комиссии

 А. Ю. Дёмин

 В. С. Дмитриев