

На правах рукописи



Долгих Антонина Геннадьевна

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
С ЛЕНТОЧНОЙ ОБМОТКОЙ ЯКОРЯ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Бориков Валерий Николаевич

Официальные оппоненты: **Кононенко Константин Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, кафедра «Электромеханических систем и электроснабжения», профессор

Приступ Александр Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет, кафедра электромеханики, доцент

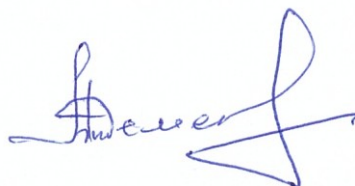
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), г. Санкт-Петербург

Защита состоится «27» декабря 2017 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>.

Автореферат разослан «__» ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Ю. Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Электромеханические преобразователи являются неотъемлемой частью современных технических систем. Отдельное место среди электромеханических преобразователей занимают моментные электродвигатели, 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. Моментные двигатели также называются электродвигателями прямого (безредукторного) привода.

Внешне моментные двигатели отличаются от двигателей классического исполнения, так как не имеют корпуса, вала, подшипников и потребителю представляются 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. 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. Галеева. В работах профессора А. Г. Микерова, 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». 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.

Проведенные исследования показывают, что отечественные моментные двигатели по ряду характеристик, в частности, по статической добротности, уступают аналогичным моментным двигателям зарубежных производителей. В связи с этим актуальной является задача совершенствования существующих отечественных двигателей, которую можно решить, как использованием совре-

менных 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 обмотки 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 автоматики 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 проек-

тирования 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 «Полус», 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, Neřtity, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, определены решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе «Моментные двигатели с постоянными магнитами» проведен анализ современного состояния моментных двигателей в России и за рубежом, приведены пути возможного повышения удельных характеристик моментных двигателей с постоянными магнитами, предложено конструктивное исполнение активного элемента моментного двигателя в виде ленточной намотки, рассмотрен вариант подхода к изготовлению ленточной намотки с использованием аддитивных технологий.

Проведенный анализ показывает, что технические характеристики зарубежных моментных двигателей превосходят аналоги отечественного производства, в частности, по коэффициенту статической добротности. В качестве путей совершенствования моментных двигателей указываются: применение новых магнитных материалов; изменение конструкции ротора; использование новых типов обмоток. Повышения коэффициента статической добротности можно добиться за счет увеличения момента, развиваемого двигателем при пропускании через его обмотки тока большой величины. Однако, в случае протекания по обмоткам такого тока, возникают проблемы, связанные с тепловым режимом работы двигателя. Повышенная температура 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. В данной ситуации предложено заменить традиционную обмотку двигателя ленточной намоткой. Термин «намотка» в данном случае введен, во-первых, по причине существенного отличия такого активного элемента от традиционных обмоток, выполненных обмоточным проводом, и, во-вторых, характер технологического выполнения представляет собой рулонную намотку ленты на основу, связанную с корпусом (статором) двигателя. Такой вариант исполнения активного элемента предложен в 2008 году в Томском политехническом университете В. М. Мартемьяновым. 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 необходимой характеристики «момент-угол поворота ротора» за счет выполнения в ленте боковых вырезов при помощи луча лазера.

Соппротивление тепловому потоку, исходящему от нагретых токоведущих частей в случае ленточной структуры, будет существенно меньше, чем у традиционных обмоток, выполненных обмоточным проводом.

В случае пазового статора тепло от лобовых частей обмотки отводится в окружающий воздух, а от проводников, расположенных в пазах – сбрасывается на сердечник статора и затем на корпус двигателя. Проводники обмотки, находящиеся в пазе, охлаждаются неравномерно: в более благоприятном положении будут те из них, которые расположены по периметру паза, в то время как для находящихся в центральной части, отвод тепла будет затруднен. В целом, основное сопротивление для теплового потока создается пазовой изоляцией. Не менее затруднительным является отвод тепла и от обмоток гладкого статора, которые выполняются на пластиковых основах или формируются с помощью компаундных материалов.

В ленточной намотке у токоведущих элементов (пластин, витков) поверхности охлаждения достаточно велики, и они могут осуществлять полный тепловой контакт с корпусом двигателя. Соппротивление тепловому потоку в данном случае будут составлять тонкие слои электрической изоляции, нанесенной на ленту. Ситуация с отводом тепла улучшится, если материал, из которого состоит электрическая изоляция, будет обладать хорошей теплопроводностью.

Перспективным считаем прием, когда структура, аналогичная ленточной намотке, будет изготавливаться методами аддитивных технологий. В этом случае на основу (элемент корпуса двигателя), выполненную из электрически непроводящего и немагнитного материала с хорошей теплопроводностью (например, из керамики) наносится слой металла, имеющий геометрию, аналогичную ленточной структуре. Поверх нанесенного слоя металла накладывается сплошной слой электроизоляционного материала с хорошей теплопроводностью, причем этот слой должен контактировать с элементом корпуса. Затем поочередно наносятся слои металла и изолятора до полного изготовления активного элемента.

Во второй главе «Характеристики пластины как элемента ленточной намотки» проведен анализ отдельных частей ленточной намотки.

Для пояснения принципа действия двигателя с ленточной намоткой на рисунке 1 показана тонкая токопроводящая пластина, подключенная к электрической цепи в вершинах двух ее диагонально расположенных углов.

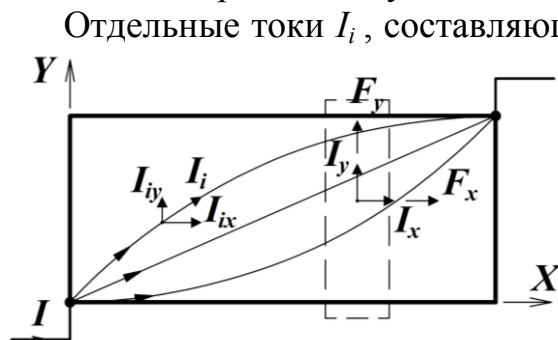


Рисунок 1 – Электропроводящая пластина

Каждая точка будет иметь две компоненты I_{ix} и I_{iy} . Суммирование токов, протекающих в зоне действия магнитного потока, выделенной штриховой линией, покажет, что в данной зоне имеются две составляющие полного тока I_x и I_y . Ток I_y , взаимодействуя с источником магнитного поля, создаст силу F_x , направленную по оси X , а ток I_x – силу F_y , направленную по оси Y . 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 полезный эффект при работе двигателя. Создаваемая сила может быть увеличена последовательным электрическим соединением нескольких аналогичных изолированных пластин, собранных в пакет, где пластины расположены одна над другой. Соответствующее электрическое подключение должно обеспечить идентичное протекание тока во всех пластинах. Ситуация с подключением существенно упрощается, если рассматривать круговой активный элемент, который также можно представить состоящим из нескольких пакетов. Как указано выше, круговой активный элемент предложено назвать ленточной намоткой.

Для изготовления пакета пластин и ленточной намотки возможно использование тонкой электропроводящей ленты. Диагональный характер протекания тока при этом обеспечивается выполнением боковых вырезов. На рисунке 2 показана структура моментного двигателя с ленточной намоткой 4, представляющей собой спирально намотанную ленту, помещенную в зазор между многополюсным магнитом 1 и магнитопроводом 2, соединенных немагнитным диском 3. В моментном двигателе с ленточной намоткой применение многополюсного

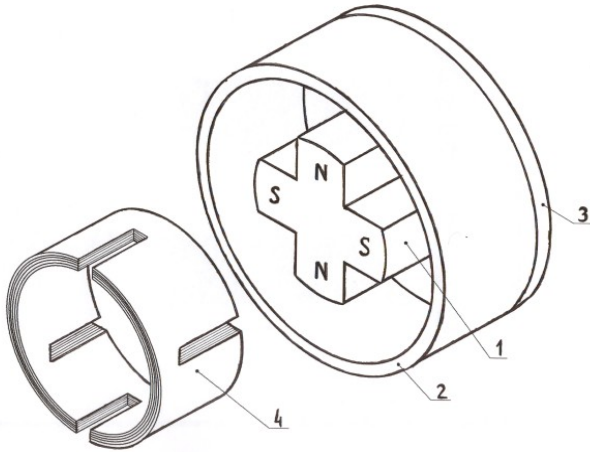


Рисунок 2 – Структура моментного двигателя с ленточной намоткой

есть не зависит от координаты z . Сила F_x может быть определена интегрированием компоненты плотности тока $j_{My}(x,y)$ в точке M :

$$F_x = B \cdot \int_{(x-c/2)0}^{(x+c/2)b} \int_0^{\Delta} j_y(x,y) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = B \cdot \Delta \cdot \int_{(x-c/2)0}^{(x+c/2)b} \int_0^b j_y(x,y) \cdot dx \cdot dy. \quad (1)$$

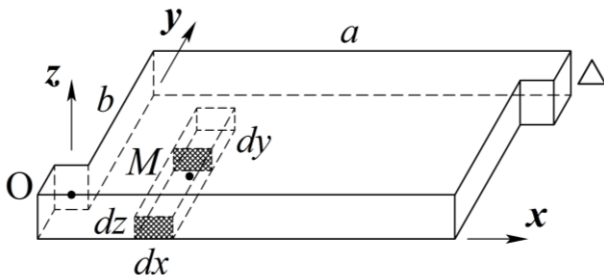


Рисунок 3 – Элемент тока в окрестности точки M

где: b – ширина пластины, м; c – размер зоны действия магнитного поля в направлении оси x , м.

В дальнейшем, для упрощения записи двойного интеграла в выражении (1) введем обозначение

$$D(x,y) = \int_{(x-c/2)0}^{(x+c/2)b} \int_0^b j_y(x,y) \cdot dx \cdot dy. \quad (2)$$

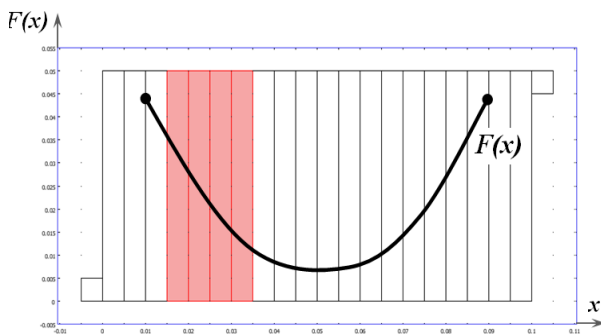


Рисунок 4 – Характер разбиения пластины на подобласти интегрирования. Силовая характеристика

характеристика $F(x)$ (рисунок 4).

магнита кратно увеличивает момент по сравнению с двухполюсным и уменьшает нагрузку на опоры подвеса ротора.

Полный ток, протекающий по пластине, имеет распределенный характер, который описывается дифференциальными уравнениями в частных производных.

Рассмотрим некоторую точку M , лежащую на поверхности пластины (рисунок 3). Элемент линии тока на участке dy в окрестности выбранной точки M будет равен $j_{My}(x,y) \cdot dx \cdot dz \cdot dy$. Предположим, что компонента плотности тока j_y одна и та же во всех слоях пластины, то

есть не зависит от координаты z . Сила F_x может быть определена интегрированием компоненты плотности тока $j_{My}(x,y)$ в точке M :

$$F_x = B \cdot \int_{(x-c/2)0}^{(x+c/2)b} \int_0^{\Delta} j_y(x,y) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = B \cdot \Delta \cdot \int_{(x-c/2)0}^{(x+c/2)b} \int_0^b j_y(x,y) \cdot dx \cdot dy. \quad (1)$$

где: b – ширина пластины, м; c – размер зоны действия магнитного поля в направлении оси x , м.

В дальнейшем, для упрощения записи двойного интеграла в выражении (1) введем обозначение

$$D(x,y) = \int_{(x-c/2)0}^{(x+c/2)b} \int_0^b j_y(x,y) \cdot dx \cdot dy. \quad (2)$$

Построение силовой характеристики пластины с током проводилось с использованием программного продукта конечно-элементного моделирования COMSOL Multiphysics. В процессе компьютерных исследований задавалась геометрия пластины, составленная из отдельных подобластей, объединяя которые, моделировалось текущее положение магнита относительно пластины. В результате интегрирования компонент плотности тока j_y и последующей обработки результатов получена силовая характеристика $F(x)$ (рисунок 4).

Формирования необходимой функциональной зависимости развиваемой силы можно добиться с помощью выполнения дополнительных боковых вырезов. На рисунке 5 показан пример выполнения 9 пар двухсторонних вырезов и полученная при этом силовая характеристика $F_x(x)$.

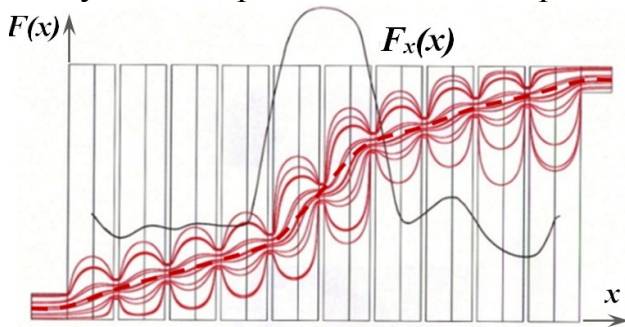
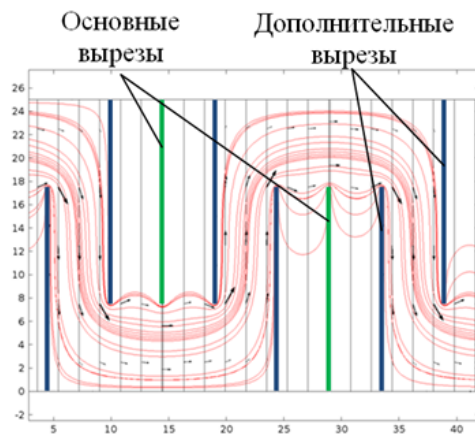


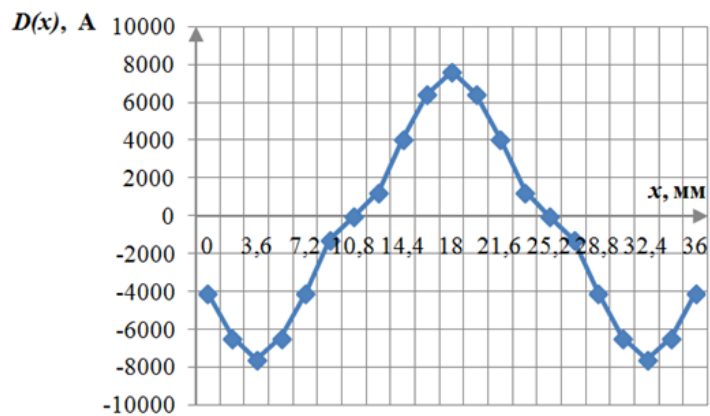
Рисунок 5 – Получение необходимой силовой характеристики

Необходимую силовую характеристику можно получить и при существенном сокращении числа вырезов. Например, при выполнении всего двух дополнительных вырезов в пластине с учетом действия тока пластин, расположенных слева и справа от данной пластины (рисунок 6, а), можно получить характеристику, близкую к треугольной форме (рисунок 6, б), здесь $D(x)$ обозначен двойной интеграл из выражения

(1). Такой прием получения необходимой силовой характеристики может быть использован при создании вентильного двигателя, обладающего малыми пульсациями момента.



а)



б)

Рисунок 6 – «Треугольная» зависимость усилия:

а) вид ленточной намотки с вырезами; б) вид силовой характеристики

Оценка сопротивления пластины проводилась при различных соотношениях длины a_i и ширины b пластины $\beta = a/b$. Для каждой относительной ширины контакта приложения напряжения $\beta_k = b_k/b$ (рисунок 7) наблюдается минимальное значение сопротивления пластины.

При проведении численных исследований температурных характеристик пакетного элемента в COMSOL Multiphysics задан пакет пластин без межслойной изоляции, с учетом того, что токовые линии отдельных пластин пакета не переходят из одного слоя в другой. Температура по окончании цикла протекания тока (1 с) не превышает 80 °С, что, например, для импульсного режима работы такого двигателя является приемлемым (рисунок 8).

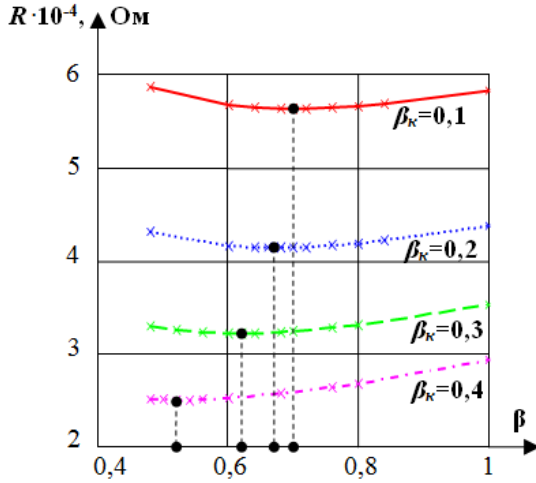


Рисунок 7 – Сопротивление пластины

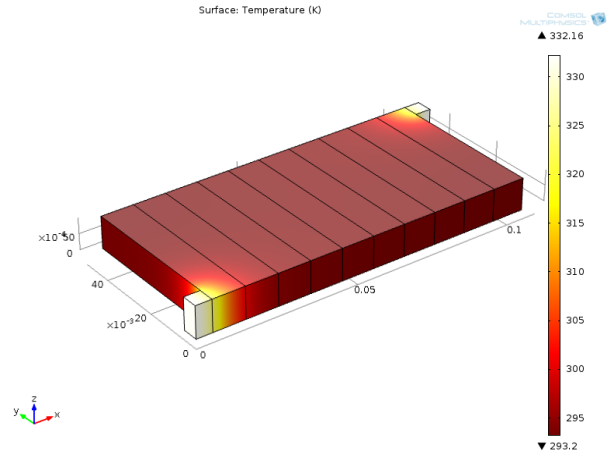


Рисунок 8 – Распределение температурного поля в пакете пластин

В третьей главе «Характеристики моментного двигателя с ленточной намоткой» проведен синтез ленточной намотки моментного двигателя на основе полученных результатов анализа.

С учетом того, что величина двойного интеграла линейно зависит от тока, выражение для силы (1), создаваемой пластиной с током определится следующим образом:

$$F_1 = B(\delta) \cdot \Delta \cdot \frac{U}{2p \cdot R \cdot N} \cdot \frac{1}{I_0} \cdot D(x, y, I_0)_{x_c}, \quad (3)$$

где: $B(\delta)$ – индукция магнитного поля, Тл; δ – длина немагнитного участка магнитной цепи, м; Δ – толщина пластины (ленты), м; U – напряжение источника питания постоянного тока, В; R – активное сопротивление пластины, Ом; 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, А. Интеграл вычисляется при нахождении центра постоянного магнита в точке x_c . I_0 – ток, при котором определяется величина двойного интеграла, А.

В многовитковой намотке выделим пакет, расположенных одна над другой идентичных пластин. Определим момент M_0 , который создается таким пакетом, находящимся под действием потока одного полюса магнитной системы

$$M_0 = \sum_{i=1}^N M_{0i}, \quad (4)$$

где: $M_{01} = F_1 \cdot r_0$; $M_{02} = F_1 \cdot (r_0 + \Delta)$; ...; $M_{0N} = F_1 \cdot [r_0 + (N-1) \cdot \Delta]$.

В данном случае r_0 – средний радиус первого витка намотки, м.

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

$$1 + 2 + 3 + \dots + (N-1) = \frac{(N-1)}{2} \cdot N. \quad (5)$$

Получим

$$M_0 = N \cdot F_1 \cdot r_0 + F_1 \cdot \frac{\Delta}{2} \cdot (N-1) \cdot N = \frac{\Delta}{2} \cdot N \cdot F_1 \cdot \left[N + \left(\frac{2r_0}{\Delta} - 1 \right) \right]. \quad (6)$$

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

$$M = 2p \cdot M_0 = p \cdot \Delta \cdot N \cdot F_1 \cdot \left[N + \left(\frac{2r_0}{\Delta} - 1 \right) \right]. \quad (7)$$

Подставив в полученное выражение (7) величину силы, создаваемой пластиной (3), получаем выражение для момента двигателя с ленточной намоткой

$$M = \frac{\Delta^2}{2} \cdot \frac{U}{I_0 \cdot R} \cdot B(\delta) \cdot \left[N + \left(\frac{2r_0}{\Delta} - 1 \right) \right] \cdot D(x, y, I_0)_{x_c}. \quad (8)$$

Число витков намотки на величину момента практически не влияет. Увеличение среднего радиуса намотки

$$r_{cp} = \frac{\Delta}{2} \left[N + \left(\frac{2r_0}{\Delta} - 1 \right) \right], \quad (9)$$

момент увеличивает незначительно. С ростом числа витков N , воздушный зазор будет увеличиваться, а индукция будет уменьшаться, поэтому N должно быть как можно меньше. Однако при этом может возрасти ток. Следовательно, выбранный ток должен быть допустимым, зависящим от возможностей источника питания и теплостойкости материала ленты:

$$\frac{U}{R \cdot N \cdot 2p} \leq I_{don}, \quad N \geq \frac{U}{2p \cdot R \cdot I_{don}}. \quad (10)$$

Число пар полюсов p не входит в выражение для момента (8), однако его влияние будет проявляться в величине двойного интеграла (2), сопротивления пластины и индукции в воздушном зазоре. Тогда выражение для момента (8) запишем в виде

$$M = k \cdot \frac{D(x, y, I_0)_{x_c}}{R} \cdot B(\delta). \quad (11)$$

Характер изменения момента от числа пар полюсов будем оценивать величиной относительного момента k_M . Учитывая (11), получаем

$$k_M = \frac{M_i}{M_1} = \frac{k}{k} \cdot \frac{B_i}{B_1} \cdot \frac{R_1}{R_i} \cdot \frac{D_i(x, y, I_0, x_c)}{D_1(x, y, I_0, x_c)} = \left(\frac{B_i}{B_1} \right) \cdot \left(\frac{R_1}{R_i} \right) \cdot \left[\frac{D_i(x, y, I_0, x_c)}{D_1(x, y, I_0, x_c)} \right]. \quad (12)$$

где: M_1 – момент, развиваемый при одной паре полюсов ($p=1$), Н·м; M_i – момент при $p=i$ пар полюсов, Н·м.

На рисунке 9 представлена упрощенная параметрическая модель магнитной цепи с возможностью изменения числа пар полюсов p и величины воздушного зазора δ . Подобная магнитная система может быть применена в двигателях-маховиках и в мотор-колесах транспортных средств. Основные размеры магнитной системы остаются неизменными. Численные исследования были проведены для двух типоразмеров магнитной системы двигателя:

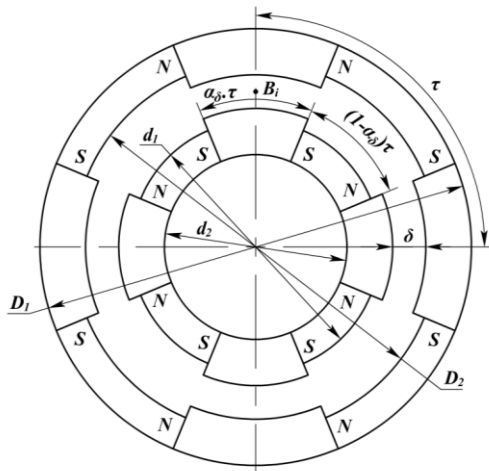


Рисунок 9 – Исследуемая магнитная система

1. $D_1=0,12$ м; $D_2=0,1$ м; $d_1=72 \cdot 10^{-3}$ м; $d_2=52 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta=10^{-2}$ м; $b=5 \cdot 10^{-2}$ м, $l_{вср}=0,27$ м.
2. $D_1=65 \cdot 10^{-3}$ м; $D_2=55 \cdot 10^{-3}$ м; $d_1=37,5 \cdot 10^{-3}$ м; $d_2=27,5 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta=5 \cdot 10^{-3}$ м; $b=25 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{вср}=0,145$ м.

В данном случае $l_{вср}$ – длина среднего витка ленточной намотки.

В обоих случаях полюсное перекрытие было задано $\alpha_{\delta}=0,5$. В COMSOL Multiphysics согласно параметрической модели, представленной на рисунке 9, была определена индукция магнитного потока B_i под центром полюсов в рабочем воздушном зазоре при каждом значении числа пар полюсов. Приведенные на рисунке 10 графики зависимости

относительной индукции от числа пар полюсов при различных величинах воздушного зазора для второго типоразмера, показывают, что при увеличении воздушного зазора максимальное значение индукции наблюдается при меньшем числе пар полюсов. Все приведенные ниже результаты также относятся к двигателю второго типоразмера.

Характер изменения сопротивления соответствует представленному на рисунке 7. При этом обратные относительные сопротивления, которые являются множителем в выражении для относительного момента (12), будут иметь максимум при определенном числе пар полюсов (рисунок 11).

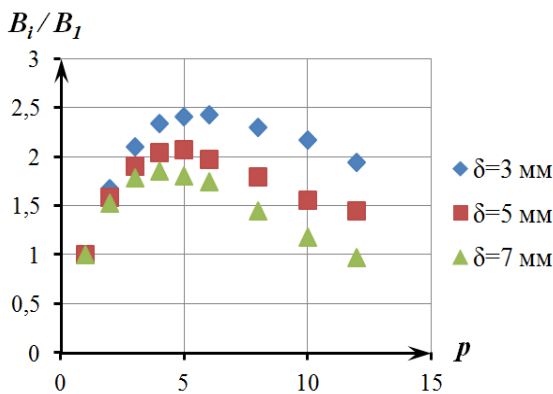


Рисунок 10 – График зависимости относительной индукции от числа пар полюсов

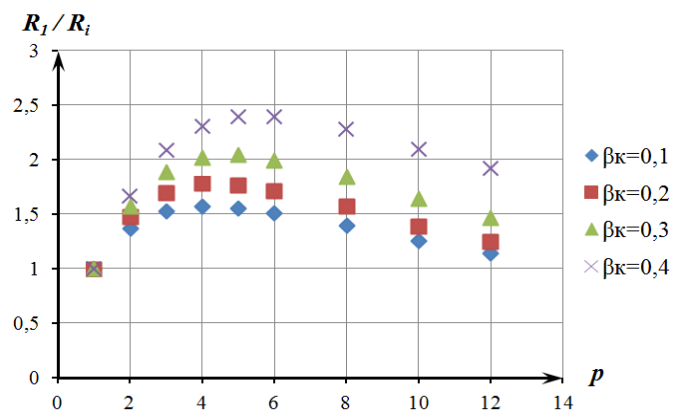


Рисунок 11 – Характер изменения обратных относительных сопротивлений от числа пар полюсов

Относительная величина двойного интеграла (2), приведенная к току через пластину $I_0 = 1$ А, при различных числе пар полюсов p и относительной величины контакта β_k будет близка к единице (рисунок 12).

Исходя из полученных выше результатов и пользуясь выражением (12), определен характер изменения относительного момента от числа пар полюсов (рисунок 13).

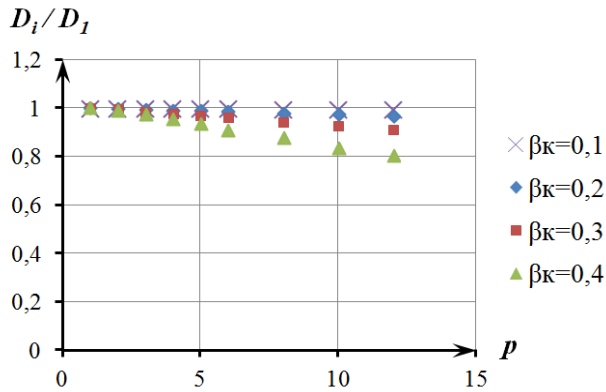


Рисунок 12 – Характер изменения относительной величины двойного интеграла от числа пар полюсов

Если считать, что мощность, потребляемая двигателем от источника определяется как

$$P = \frac{U^2}{2p \cdot R \cdot N}, \quad (13)$$

то относительная потребляемая мощность будет иметь вид

$$k_p = \frac{P_i}{P_1} = \frac{R_1}{p \cdot R_i} = \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{R_1}{R_i} \right); \quad (14)$$

где: $i = p$.

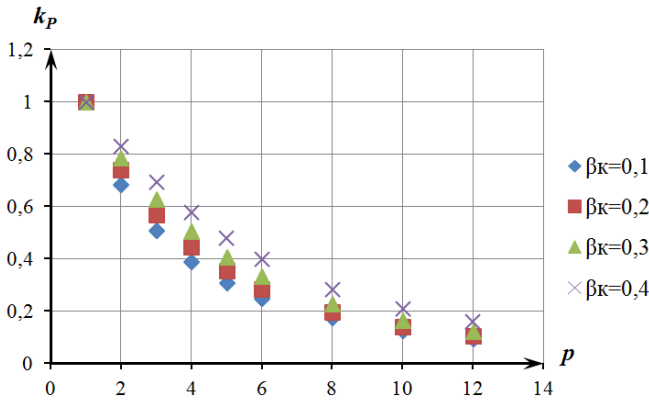


Рисунок 14 – Характер изменения относительной мощности потребления от числа пар полюсов

На рисунке 14 показан характер изменения относительной мощности от числа пар полюсов.

Для анализа характеристик предложенного варианта моментного двигателя были проведены расчеты развиваемого момента, потребляемой мощности и добротности для варианта с одной парой полюсов $p=1$ при $\beta_k=0,2$ для каждого типоразмера. В обоих случаях напряжение питания было выбрано так, чтобы ток через контакты катушки имел величину 100 А. При расчете были использованы и получены следующие числовые значения для двух типоразмеров моментного двигателя с ленточной катушкой:

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

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

В результате расчета, для первого типоразмера получен развиваемый момент $M_{л1}=3$ Н·м; потребляемая мощность $P_{л1}=1227$ Вт; статическая добротность

$Q_{II}=0,03 \text{ (Н·м)/(кг·Вт}^{0,5}\text{)}$. Для второго типоразмера получен развиваемый момент $M_{II}=0,25 \text{ Н·м}$; потребляемая мощность $P_{II}=371 \text{ Вт}$; статическая добротность $Q_{II}=0,03 \text{ (Н·м)/(кг·Вт}^{0,5}\text{)}$.

Приведенные выше результаты анализа в виде графиков в относительных единицах позволяют оценить основные характеристики двигателя при других значениях числа пар полюсов и относительной ширины контакта. В рассматриваемом случае считаем, что наиболее оптимальным является выбор числа пар полюсов $p=5$. Используя рассчитанные значения при одной паре полюсов и зависимости относительного момента от числа пар полюсов, получено, что момент при $p=5$ для типоразмера 1 равен $M_{I5}=9,735 \text{ Н·м}$, для типоразмера 2 – $M_{II5}=0,91 \text{ Н·м}$. Эти моменты 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 приблизительно равной $0,82M_{max}$.

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 этом момент будет увеличиваться до $1,5M_{max}$. В этом случае учтено снижение индукции в зазоре вследствие увеличения последнего при добавлении намотки второй фазы. Включение двух намоток увеличит потребляемую из сети мощность в два раза. Тогда можно считать, что характеристики предлагаемых двигателей будут иметь следующие величины: $M_{I5}=1,5 \cdot 9,735=14,5 \text{ Н·м}$; $P_{I5}=738,6 \text{ Вт}$; $M_{II5}=1,5 \cdot 0,91=1,365 \text{ Н·м}$; $P_{II5}=263,4 \text{ Вт}$.

Полученные результаты позволяют провести сравнение с бесконтактными моментными двигателями с гладким статором серии ДБМ. Для сравнения с двигателем первого типоразмера выбран двухфазный двигатель ДБМ130-1,6-0,5-2 с пусковым моментом $1,5 \text{ Н·м}$ при напряжении фазы $U_{\phi}=27 \text{ В}$. Активное сопротивление фазы R_{ϕ} изменяется от $3,6 \text{ Ом}$ до $4,4 \text{ Ом}$, осевая длина $54,5 \text{ мм}$, внешний диаметр 130 мм , масса $2,5 \text{ кг}$. На основании приведенных данных определяется ток фазы $I_{\phi}=27/4=6,75 \text{ А}$, мощность потребления двух фаз $P=2 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi}=2 \cdot 6,75 \cdot 27=364 \text{ Вт}$. Для сравнения с двигателем второго типоразмера рассмотрим двигатель ДБМ63-0,06-3-2, который имеет следующие характеристики: пусковой момент $0,11 \text{ Н·м}$, $U_{\phi}=27 \text{ В}$, R_{ϕ} изменяется от $7,4 \text{ Ом}$ до $9,2 \text{ Ом}$. Отсюда $I_{\phi}=27/8,5=3,18 \text{ А}$; $P=2 \cdot 3,18 \cdot 27=172 \text{ Вт}$.

Сравнение параметров моментного двигателя с ленточной намоткой типоразмера 1 с двигателем ДБМ130-1,6-0,5-2 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.

Полученные при сравнении результаты показывают преимущества двигателя с ленточной намоткой: при близких габаритах развиваемый момент увеличен в большее число раз, чем выросла потребляемая мощность. Однако необходимо сделать следующие замечания. Расчетные величины соответствуют форсированному режиму работы, когда большой ток протекает кратковременно.

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 ниже при рассмотрении одного участка катушки, то второй, вызывающий искажения линий распределенного тока, протекающего по пластинам катушки под действием магнитного поля, может быть учтен в дальнейшем при проведении экспериментальных исследований с учетом поправочных коэффициентов.

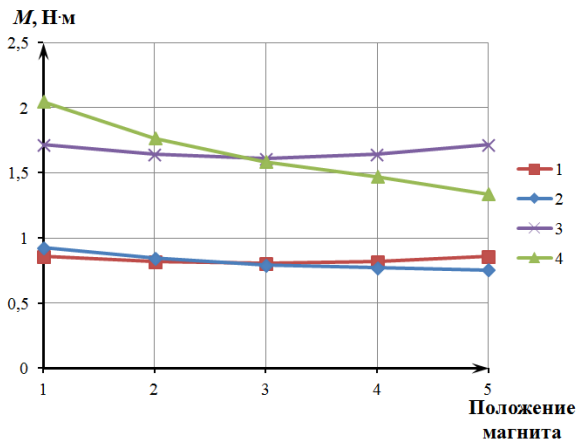


Рисунок 15 – Характер изменения момента при протекании тока по катушке

(кривые 2 и 4), связывающей развиваемый двигателем момент и угол поворота ротора, относительно ее центра. При реверсе тока поворот характеристики происходит в противоположном направлении.

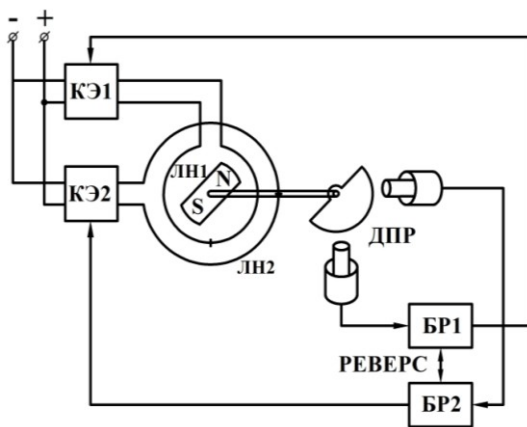


Рисунок 16 – Схема вентильного двигателя

С учетом влияния тока ленточной катушки на основной магнитный поток моментного двигателя характеристика «момент-угол поворота ротора» будет иметь вид, представленный на рисунке 15. Нижняя группа кривых 1 и 2 относится к току через контакты ленточной катушки 50 А, верхняя 3 и 4 – 100 А. Кривые 1 и 3 являются результатом расчета, когда влияние реакции якоря не учитывалось. Кривые 2 и 4 получены при учете влияния реакции якоря. Таким образом, под действием реакции тока катушки происходит вращение характеристики

Предложенная ленточная катушка может быть применена в двухфазном вентильном двигателе (рисунок 16), который строится на основе моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора (рисунок 2) с добавлением второй секции, сдвинутой относительно первой на половину полюсного деления. На рисунке 16 приведены следующие обозначения: ЛН – ленточная катушка, КЭ – ключевой элемент, изменяющий направление протекания тока, БР – блок реверса, ДПР – датчик положения ротора. Вторая катушка, 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. Если зависимости развиваемых моментов обеих катушек будут идентичными и представлять сочетание равнобедренных треугольников, то результирующий момент двигателя будет неизменным при всех положениях ротора; в идеале пульсации момента будут отсутствовать. В результате численного моде-

лирования получены результирующие характеристики момента без учета действия тока катушки и с учетом его действия (рисунок 17).

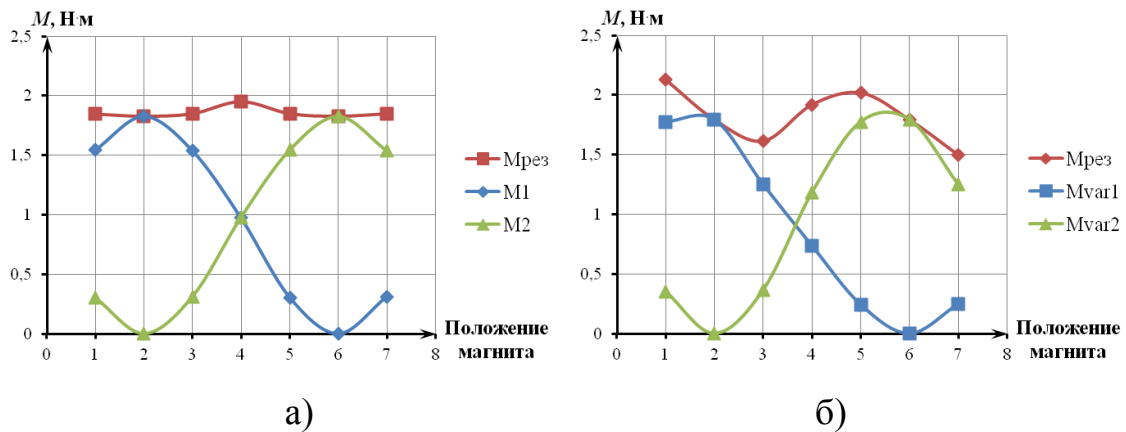


Рисунок 17 – Результирующая характеристика момента от угла поворота ротора вентильного двигателя: а) без учета действия тока катушки; б) с учетом действия тока катушки

Анализ величины тормозного момента, вызванного действием вихревых токов при вращении ротора моментного двигателя производился с использованием программного продукта Agros2D. В данном случае тепловые потери в катушке, вызванные действием переменного магнитного поля, частота которого определяется частотой вращения ротора, приравнялись к механической мощности, затрачиваемой двигателем на торможение.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования элементов и макетного образца моментного двигателя с ленточной катушкой» проведены экспериментальные исследования теплостойкости пластины и ее сопротивления, исследованы основные характеристики моментного двигателя с ленточной катушкой на изготовленных экспериментальных установках.

На рисунке 18 приведен общий вид экспериментальной установки, включающей макет моментного двигателя с пакетным элементом. Пакетный элемент изготовлен из алюминиевой ленты толщиной 0,07 мм, покрытой бумажной изоляцией. В зазоре магнитопровода шириной 18 мм создается индукция $B = 0,038$ Тл. На основании установки смонтирован узел крепления пакетного элемента, помещаемого в воздушный зазор магнитопровода источника постоянного магнитного поля (рисунок 19).



Рисунок 18 – Общий вид экспериментальной установки

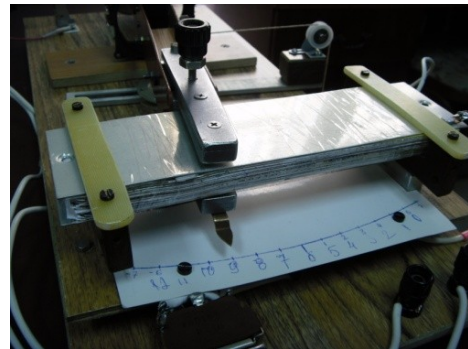


Рисунок 19 – Пакетный элемент в воздушном зазоре магнитопровода

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 усилие, развиваемое исполнительным элементом при данном значении тока.

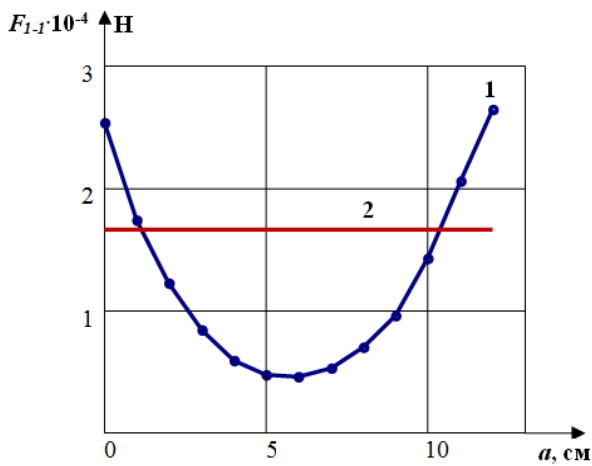


Рисунок 20 – Развиваемое усилие по длине пакета

На изготовленной установке был проведен ряд экспериментальных исследований. На рисунке 20 показана зависимость силы, развиваемой исполнительным элементом, по длине пакета a (кривая 1). 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. Прямая 2 на этом графике представляет собой зависимость усилия, которое могло быть создано единичным тонким проводником, расположенным по диагонали

пакета и по которому протекает ток в 1 А.

Для проведения исследований характеристик моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора была разработана и изготовлена соответствующая установка, общий вид которой приведен на рисунке 21.

В состав установки входит макет моментного двигателя с устройством нагружения, источник питания и контактный датчик, позволяющий определить преодоление двигателем момента нагрузки. 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 срабатывание 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. Основные элементы макетного образца представлены на рисунке 22, 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. Магнитная система ротора 2 состоит из четырех пар постоянных магнитов. 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.



Рисунок 21 – Экспериментальная установка

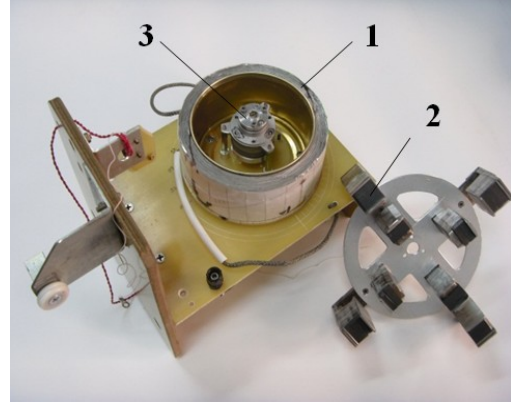


Рисунок 22 – Основные элементы макета двигателя

На рисунке 23 приведена характеристика «момент-угол поворота ротора», отнесенная к одному витку намотки при токе 1 А.

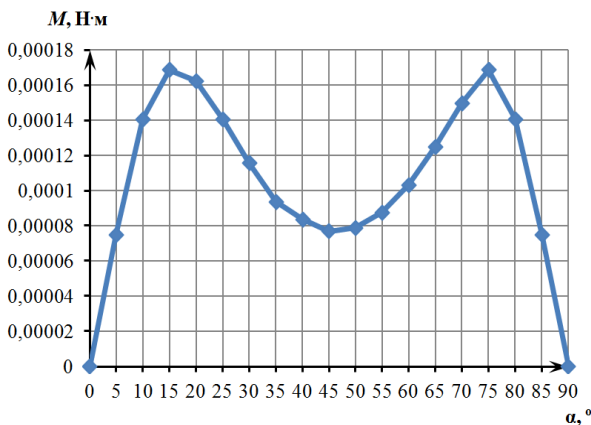


Рисунок 23 – Распределение момента по углу поворота

определить коэффициент скоростного сопротивления. Эксперимент проводился как с наличием в макете намотки, так и при ее отсутствии. Отличие в характере затухания колебаний в этих случаях позволило определить коэффициент скоростного сопротивления, вызываемого действием вихревых токов.

Сравнение результатов экспериментальных исследований и математического моделирования, проведенного в главе 3 настоящей работы, показало, что крутизна характеристики момента торможения от скорости вращения, рассчитанная аналитически, лежит внутри диапазона, полученного экспериментально:

$$k = \frac{M_{em}}{\omega}. \quad (15)$$

Используя выражение (15), получили $k=5,3 \cdot 10^{-4}$ Н·м·с.

Результаты исследования зависимости сопротивления пластины от соотношения ее длины и ширины были подтверждены экспериментально. Минимальное значение сопротивления наблюдается при соотношении длины и ширины пластины $\beta=0,7$ для варианта относительной ширины контакта $\beta_k=0,2$.

В приложении диссертации приведены акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **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.
2. **Иванова (Долгих), А. Г.** Активный элемент моментного двигателя / В. М. Мартемьянов, А. Г. Иванова (Долгих) // Контроль. Диагностика. – 2011. – специальный выпуск. – С. 109-111.
3. **Иванова (Долгих), А. Г.** Применение исполнительных устройств с пакетным элементом в системах автоматики / А. Г. Иванова (Долгих), В. М. Мар-

темьянов, К. А. Татарникова и др. // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 13. – С. 173-178.

4. **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.

5. **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.

6. **Dolgiĥ, A. G.** Analytical studies of torque motor tape active element / A. G. Dolgiĥ, V. M. Martemyanov, I. N. Samodurov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 48. – Article number 01004, DOI: 10.1051/confmatec/20164801004.

7. **Dolgiĥ, A. G.** The tape winding current impact on the motor's torque curve / A. G. Dolgiĥ, V. M. Martemyanov, I. N. Samodurov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 102. – Article number 01014, DOI: 10.1051/matecconf/201710201014.

8. **Dolgiĥ, A. G.** Active element influence on the motor's torque / A. G. Dolgiĥ, V. M. Martemyanov, V. N. Borikov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 113. – Article number 01013, DOI: 10.1051/matecconf/201711301013.

Свидетельства интеллектуальной собственности

9. 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.

10. 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.

Статьи в других изданиях

11. **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).

12. **Ivanova (Dolgiĥ), A. G.** Executive unit with an active tape element for management system / A. G. Ivanova (Dolgiĥ), V. M. Martemjanov // Proceedings of 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – September 12-13, 2013, Krasnoyarsk, Russia. – pp. 1-3.

13. **Dolgiĥ, A. G.** Parameters of the torque motor tape winding / A. G. Dolgiĥ, V. M. Martemyanov // Proceedings of 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – May 12-14, 2016, Moscow, Russia. – pp. 1-4.