Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ»

На правах рукописи

ДАВЫДОВ Николай Владимирович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА С МНОГОСЛОЙНЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ И УЛУЧШЕННЫМИ МАССОГАБАРИТНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

Специальность: 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Афанасьев Анатолий Юрьевич

Казань 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ4
1 ПРОБЛЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ10
1.1 Современное состояние синхронных электрических машин 11
1.2 Современное состояние электромагнитных передаточных устройств 26
1.3 Основные задачи и пути их решения
2 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
С МНОГОСЛОЙНЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ РОТОРА
И СТАТОРА
2.1 Общие принципы построения электрических машин с многослойными
магнитопроводами ротора и статора32
2.2 Основные конструктивные схемы и соотношения
2.2.1 Линейный шаговый электродвигатель 34
2.2.2 Шаговый электродвигатель 40
2.2.3 Синхронный электродвигатель с реактивных ротором 45
2.2.4 Электромагнитная муфта 51
2.2.5 Магнитный редуктор 56
2.2.6 Электромагнит
ВЫВОДЫ65
З РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ЭЛЕКТРОМАГНИНЫХ
УСТРОЙСТВ С МНОГОСЛОЙНЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ 66
3.1 Методика расчет шагового двигателя с многослойным ротором и
статором 66
3.1.1 Исходные данные и задачи расчета
3.1.2 Определение главных размеров ШД с МР 67
3.1.3 Определение электромагнитных нагрузок 69

3.1.4 Выбор числа фаз и конфигурации магнитной системы	70
3.1.5 Выбор внешнего диаметра статора	70
3.1.6 Проектирование зубцовой зоны статора и ротора	72
3.1.7 Расчет/проверка крутящего момента	74
3.1.8 Определение обмоточных данных	75
3.2 Пример расчета варианта с 1-им и 3-мя рабочими зазорами	76
3.3 Сравнительный расчет многослойных ШД	85
3.4 Численный расчет магнитного поля ШД с многослойной	
рабочей зоной	88
ВЫВОДЫ	95
4 ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ С МНОГОСЛОЙНЫМИ	
МАГНИТОПРОВОДАМИ РОТОРА И СТАТОРА	96
4.1 Исследование влияния ширины ферромагнитных элементов на усилие	
электромагнит	96
4.2 Исследование влияния длины рабочего зазора на усилие	
электромагнита	101
4.3 Эксперимент лабораторный. Исследование электромагнитов с	
многослойными магнитопроводами статора и лайнера	106
4.4 Сравнение результатов численного моделирования и	
лабораторных данных	110
ВЫВОДЫ	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
Библиографический список	123
ПРИЛОЖЕНИЕ	133

введение

Актуальность темы. В настоящее время электрический привод является основным типом привода, преобразующим электрическую энергию в механическую. Силовым узлом электропривода является электрический двигатель. Известны и используются в современной промышленности различные типы электрических двигателей: асинхронный, синхронный, двигатели постоянного тока и т.д. Однако в задачах прямого привода, прецизионных приводах, приводах требуемых высоких массогабаритных показателей одними из основных типов приводов и передаточных устройств являются синхронные машины и электромагнитные устройства (муфты, редуктора, электромагниты).

Синхронные электрические машины и электромагнитные устройства используются в таких областях как авиация, космос, транспортные средства, станки, робототехнические системы и т.д. Для данных областей одним из основных параметров, наряду с остальными, является массогабаритный показатель – отношение крутящего момента или усилия к массе или объему двигателя или электромагнитного устройства. Чем меньше масса или габариты электрической машины или электромагнитного устройства, тем меньшие затраты энергии (топлива) необходимы для транспортировки/перемещения данного объекта, что является актуальным для авиации, космоса, робототехнических систем, мобильных транспортных устройств. Помимо экономии энергии, не менее актуальной стоит задача ресурсосбережения, а именно использование конструкций электрических машин и электромагнитных устройств с более эффективным использованием редкоземельных постоянных магнитов, запасы которых ограничены, или возможность замены двигателей и электромагнитных устройств с постоянными магнитами на конструкции с сопоставимыми массогабаритными показателями, но с реактивными магнитопроводами ротора и статора.

Степень разработанности. Вопросами проектирования и расчета синхронных электрических машин и электромагнитных устройств посвящены работы таких ученых как:

А.В. Иванов-Смоленский, И.П. Копылов, О.Д. Гольдберг, А.Г. Микеров, Ю.М. Беленький, Miller T.J.E. и др. Однако, вопросы улучшения массогабаритных показателей синхронных электрических машин и электромагнитных устройств не имеют однозначного решения и являются актуальными на сегодняшний день.

Объект исследования – электрические машины и электромагнитные устройства (муфты, редукторы, мультипликаторы, электромагниты) с многослойными магнитопроводами ротора и статора.

Предмет исследования – массогабаритные показатели электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами ротора и статора.

Цель работы – создание новых типов электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами с улучшенными массогабаритными показателями.

Достижение поставленной цели предполагает решение ряда задач, среди которых:

1. Разработка новых конструктивных схем электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами, обладающих улучшенными массогабаритными показателями.

2. Создание компьютерных моделей и аналитических методик расчета магнитных систем и параметров синхронных электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами.

3. Создание опытного образца электромагнитного устройства с многослойными магнитопродами и экспериментальное исследование его характеристик.

4. Сопоставление экспериментальных и расчетных параметров электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами и калибровка математических моделей. 5. Разработка рекомендаций по расчету и проектированию новых типов электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами в перспективных областях промышленности и энергетики.

Методология и методы диссертационного исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математической физики, теории поля, аналитические методы теории электромеханических систем, метод конечных элементов, компьютерное моделирование и экспериментальное исследование. Для реализации моделей были применены стандартные программные продукты: Компас 3d, Inventor, Ansoft Maxwell, Mathcad, MS Excel. Экспериментальные исследования проводились на опытном образце многослойного электромагнита.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана новая методология построения многослойных магнитных систем рабочих зон синхронных электрических машин и электромагнитных устройств с улучшенными массогабаритными показателями.

2. Предложены конструктивные схемы электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами.

3. Получены аналитические зависимости выходных характеристик и параметров электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами, учитывающих многослойную геометрию магнитопроводов.

4. Разработаны модели для численного расчета магнитных полей, параметров и выходных характеристик электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами методом конечных элементов.

5. Разработана методика расчета шагового двигателя с реактивным ротором и с многослойными магнитопроводами статора и ротора.

На защиту выносятся:

1. Основные положения в проектировании многослойных магнитных систем.

2. Методика проектирования электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами, заключающаяся в предваритель-

ном расчете основных размеров магнитной системы аналитическими методами с последующей оптимизацией геометрии на численных полевых математических моделях по критерию максимума выходного крутящего момента.

3. Результаты исследований электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами, полученных с помощью полевых математических моделей в виде рекомендаций по увеличению выходного крутящего момента.

4. Методика расчета шагового электродвигателя с многослойными магнитопроводами статора и ротора.

Теоретическая и практическая ценность работы:

1. Разработана методология построения магнитных систем электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными решетчатыми магнитопроводами и с улученными массогабаритными показателями.

2. Разработаны алгоритмы расчета геометрии многослойной рабочей зоны и параметров электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами.

3. Создан и испытан опытный образец электромагнита с многослойным магнитопроводом.

4. Разработана методика расчета шагового электродвигателя с многослойными магнитопроводами.

5. Разработаны конструкции шагового двигателя, синхронного двигателя, электромагнитной муфты, магнитного редуктора и электромагнита поступательного движения с многослойными магнитопроводами.

6. Разработаны компьютерные модели для расчета и исследования многослойных магнитных систем.

Обоснованность и достоверность выводов и результатов работы достигается использованием при решении поставленных задач классических математических методов и методов исследования электрических машин, экспериментальным подтверждением принятых положений, сопоставлением результатов с общеизвестными, опубликованными в научно-технической литературе исследованиями.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты:

1. Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов.

Реализация результатов работы.

Результаты диссертационной работы внедрены в АО «НИИ Турбокомпрессор» им. В.Б. Шнеппа и в учебный процесс кафедры Электрооборудования КНИ-ТУ-КАИ им. А.Н. Туполева.

Технические решения защищены 9 патентами РФ на изобретение и одним патентом РФ на полезную модель.

Апробация работы. Основные положения и результаты докладывались и обсуждались на III Республиканской н/т конф. «Автоматика и электронное приборостроение» (г. Казань, 2006 г.), XIV, XV и XVI Междунар. молодеж. науч. конф. «Туполевские чтения» (г. Казань, 2006, 2007 и 2008 г.), XIX и XX Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» (г. Казань, 2007 г, 2008 г.), IX и XIV Международных симпозиумах «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2008 г., 2014 г.), IV междун. н/п конф. «Современные технологии АКТО» (г. Казань, 2008 г.), XV междун. н/т конф. по компрессорной технике «ЗАО «НИИ-турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» (г. Казань, 2011).

Публикации по работе. Результаты работы опубликованы в 21 печатной работе (в 3 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК, в 8 патентах на изобретения РФ, в одном патенте на полезную модель РФ и в 9 трудах конференций и симпозиумов).

-8-

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, одного приложения, списка использованных источников из 90 наименований. Объем работы – 122 с. машинописного текста, 4 таблицы, 65 рисунков.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В настоящее время электрический привод занимает лидирующие позиции среди остальных типов приводов. Одним из основных элементов электрического привода является электрический двигатель. В зависимости от задач, целей, условий эксплуатации, требований точности, надежности и иных параметров выбирается соответствующий тип электрической машины – асинхронный, синхронный, двигатель постоянного тока и т.д.

Среди прочих характеристик электрических двигателей одним из основных является массогабаритный показатель, характеризующий отношение крутящего момента или усилия к массе или габаритным размерам (объему) электрической машины. Данный показатель является интегральным показателем уровня технического совершенства используемых подходов в построении электрических машин. Он зависит от многих факторов, таких как:

 используемые материалы, активные (ферромагнитные элементы, обмотка),
пассивные (конструктивные элементы, обеспечивающие выполнение предъявляемых технических характеристик);

- конструктивная схема магнитной системы;

 – физические явления, на которых основаны принципы работы электрических машин;

- способы управления электрическими машинами;

– условия работы – климатические, требования надежности и т.д.;

- использование различных источников магнитного поля;

- технологические возможности и т.д.

В настоящей главе рассматривается современное состояние конструктивных решений в области синхронных электрических машин (СЭМ) и электромагнитных устройств (ЭУ) с высокими показателями удельного момента и/или мощности.

Рассматриваются различные существующие подходы и способы в улучшении массогабаритных показателей СЭМ и ЭУ.

1.1 Современное состояние конструирования синхронных электрических машин

Современный электропривод содержит элементы управления и преобразования электрической энергии, основанные на достижениях цифровой микроэлектроники и силовой электроники. При этом некоторые элементы электропривода совмещены с исполнительным механизмом (рабочим органом). Простоту конструкции и наилучшие показатели управления показывают электроприводы на основе синхронных электродвигателей, в частности вентильных двигателей, без использования передаточного механизма (редуктора). Электроприводы без передаточного механизма принято называть прямыми электроприводами.

Во второй половине XX в. появился термин «прямой электропривод». Данный термин использовался для обозначения безредукторных электроприводов с синхронными электрическими машинами малой мощности с самокоммутацией. Прямой электропривод использовался изначально преимущественно в аудио- и видеоаппаратуре и получил широкое распространение благодаря высокой стабильности частоты вращения, малым габаритам и массе. Более широкому применению в точных и силовых электроприводах данного электропривода мешали его малые мощности. Компания Adept Technology в 1984 г. впервые использовала прямой электропривод в роботах типа SCARA – начав широкое распространение прямого электропривода в точных и силовых электроприводах.

Увеличение мощности и точности прямого электропривода связано с развитием микроэлектроники и силовых полупроводниковых приборов, появлением новых конструкций синхронных машин и различных типов датчиков. Некоторые образцы прямых электроприводов имеют мощности в сотни киловатт, а показатели точности (погрешности) угловых и линейных перемещений достигают единиц угловых секунд и микрометров. В связи с этим области применения прямого электропривода включают технологические линии, станкостроение, робототехнику, автономные транспортные средства, специальные технические устройства и т.д.



Рисунок 1.1 – Робот типа SCARA фирмы Adept Technology

Прямой электропривод имеет ряд преимуществ перед электроприводом с передаточным механизмом. Одним из преимуществ является создание крутящего момента и усилия с помощью электромагнитных сил, что исключает силы трения, возникающие в передаточном механизме, и позволяет повысить точность и быстродействие. Другое преимущество заключается в исключении упругих связей, нелинейностей и дополнительных моментов инерции передаточного механизма. Безусловно, исключение механического узла позволяет увеличить срок службы электропривода в целом, исключая элементы трения и дополнительные подшипниковые узлы.

Однако, одним из наиболее важных преимуществ для некоторых областей применения являются улучшенные массогабаритные показатели – габариты и

масса безредукторного привода меньше, чем габариты и масса электродвигателя с редуктором при прочих равных условиях.

Прямой электропривод обычно реализуется на базе синхронной электрической машины с датчиком положения ротора и управляющей электроникой или, иными словами, на базе вентильного двигателя (ВД). ВД имеют малые пульсации крутящего момента, высокие удельные ускорения и высокие показатели удельного крутящего момента.

Прямой электропривод можно определить как электропривод с прямым (без передаточного механизма) преобразованием электрической энергии в механическую. Прямой электропривод с ВД состоит (рисунок 1.2) из:

– УУ – устройства управления, которое отвечает за реализацию законов управления и контроля выходных параметров электропривода;

– ВД – вентильного электродвигателя, содержащего электронный преобразователь (ЭлП) на основе полупроводниковых приборов силовой электроники, синхронной электрической машины (СМ) и датчик положения ротора (ДП);

– рабочего органа или исполнительного механизма.

Система управления электроприводом состоит из управляющей слаботочной части и силового преобразователя. Управляющая часть обычно реализуется на основе микроконтроллеров и микропроцессоров, в которых закладывается алгоритм управления, контроля/преобразования сигналов датчиков, выдача управляющих сигналов электронному преобразователю. Силовой преобразователь реализуется на основе современных полупроводниковых приборов (IGBT, MOSFET и др.) и именуется инвертором. Инвертор преобразует энергию электрической сети согласно сигналам от управляющей части и подает ее на электромеханический преобразователь, т.е. на синхронную машину. Задача электромеханического преобразователя – преобразование электрической энергию вращения или передвижения.



Рисунок. 1.2 – Прямой электропривод на базе вентильного двигателя

В качестве электродвигателей, обеспечивающих прямое преобразование электрической энергии в механическую, могут быть использованы различные типы электрических машин. Наиболее часто используемые типы электрических машин показаны в таблице 1.1[28].

Таблица 1.1 – Типы электрических машин в прямом электроприводе

Двигатели с синусоидальным токовым питанием в функции положения				
ротора, или ВД переменного тока (ВДПТ) (англоязычный термин – BLACM)				
вентильные двигатели с возбуждени-	реактивные вентильные двигатели			
ем от постоянных магнитов (ВДПМ)	(РВД) на базе реактивных синхрон-			
на базе синхронных машин с посто-	ных машин (РСМ)			
янными магнитами (СМПМ)				
редукторные машины с постоянными	редукторные реактивные машины			
магнитами (РМПМ)	(PPM)			

Двигатели с несинусоидальным токовым питанием				
в функции положения ротора				
бесконтактные двигатели постоянно-	вентильно-индукторные двигатели			
го тока (БДПТ) с возбуждением от	(ВИД) – индукторные машины с тра-			
постоянных магнитов и трапециевид-	пециевидным токовым питанием			
ным токовым питанием (англоязыч-	(англоязычный термин «switched			
ный термин «brushless DC motor» —	reluctance motor» — SRM)			
BLDCM);				
шаговые гибридные	реактивные шаговые			

В СМПМ электрическая энергия преобразуется в механическую за счет взаимодействия намагниченного ротора и статора. В РРМ электрическая энергия преобразуется в механическую за счет действия магнитного поля статора на ферромагнитный материал ротора, имеющий различные магнитные проводимости в рабочем зазоре. Более простая конструкция у РРМ, т.к. ротор содержит лишь ферромагнитный материал в виде пакета тонколистовой электротехнической стали, а статор обмотку питания, которая и создает магнитный поток. Т.к. магнитный поток создается только обмоткой статора, то РРМ имеют больший объем активных материалов, малые рабочие зазоры по сравнению с СМПМ при одинаковых выходных характеристиках. В связи с этим, в высокоточных и динамичных электроприводах преимущественно используются СМПМ.

Кроме классификации по типу используемой электрической машины, электроприводы классифицируют по типу механического движения:

- вращающийся;
- линейный;
- планарный.

Варианты электрических машин с различными типами механического движения на основе СМПМ показаны на рис. 1.3[12 – 15].



Рисунок 1.3 – Варианты конструкций ЭМ на основе СМПМ

Линейный вариант конструкции СМПМ получается «разрезанием» цилиндрической машины вдоль оси вращения и разворачивается, таким образом, что рабочий зазор располагается в одной плоскости. В линейной синхронной машине (ЛСМ) магнитное поле получается бегущим. Для преобразования линейной синхронной машины в цилиндрическую линейную, необходимо ЛСМ «свернуть» вокруг продольной оси. ЛСМ используются в задачах малых передвижений.

Для задач, требующих большой крутящий момент и малые скорости вращения, основное применение прямого электропривода, необходимо использовать моментный двигатель (МД) – удлиненная ЛСМ и «свернутая» обратно во вращающуюся электрическую машину. Таким образом, моментный двигатель имеет отношение диаметра к его активной длине, большее единицы.

Шаговые двигатели (ШД)

Шаговый двигатель – синхронная электрическая машина, статор которой содержит зубчатые полюса, вокруг которых расположены катушки обмотки питания. Ротор зубчатый и может быть как реактивным, так и содержать постоянные магниты. При наличии постоянных магнитов ШД называют гибридными, а при отсутствии – реактивными. ШД называют редукторными, т.к. ротор и статор содержат большое и разное количество зубцов, за счет чего происходит дробление шага и ротор вращается с малыми скоростями по сравнению с синхронными и асинхронными машинами с одним или двумя парами полюсов. ШД Подобно СМ могут иметь различные реализации конструкции по типу передвижения: вращательного, линейного, цилиндрического линейного. На рисунке 1.4 показаны ШД вращающегося и линейного типов [23 – 25].

Якорь гибридного линейного ШД (ЛШД) реализуется развертыванием статора гибридного ШД с добавлением постоянных магнитов. Ротор гибридного ШД преобразуется в статор гибридного ЛШД, но без постоянных магнитов. На рисунке 1.4 показан ЛШД, якорь которого содержит два электромагнита с катушками питания и расположенный между электромагнитами постоянный магнит. Электромагниты имеют зубцы на своих полюсах. Зубцовый шаг статора совпадает с зубцовым шагом полюсов якоря, однако зубцы электромагнитов сдвинуты относительно друг друга на четверть зубцового шага.

Питание катушек управления двухфазной системой токов со сдвигом на четверть периода позволяет ослабить магнитный поток в одном полюсе и усилить магнитный поток в другом, за счет чего возникает усилие передвижения ЛШД. Полюс с наибольшим магнитным потоком, а соответственно и с наибольшим усилием стремится занять положение, при котором зубцы данного полюса якоря будут находиться напротив зубцов статора. Перемещение ЛШД на один зубцовый шаг происходит за один период изменения токов. ЛШД преобразуется в ВДПМ при питании его синусоидальными токами в функции положения якоря.



a)



Рисунок 1.4 – Шаговые двигатели с постоянными магнитами: *а* — вращающийся; *б* — линейный

Якорь ЛШД может быть собран по модульному принципу из элементарных модулей – двигателей с воздушными опорами. При построении якоря из элементарных модулей одинакового направления зубцов получаем однокоординатный ЛШД. При построении якоря из модулей с перпендикулярной ориентацией зубцов модулей относительно друг друга получаем якорь 2-хкоординатного (рисунок 1.5) или планарного ЛШД (ПЛШД) [63 – 66, 76 – 78].

Зубцы статора ПЛШД имеют взаимно перпендикулярную нарезку. Воздушные опоры позволяют якорю удерживаться над поверхностью статора. Усилие по взаимно перпендикулярным направлениям создается парами элементарных модулей с соответствующей нарезкой зубцов. При совместном действии обеих пар возможно получение крутящего момента на ограниченный угол поворота.



Рисунок 1.5 – ПЛШД – основные узлы и схема передвижения

Моментные двигатели (МД)

Основные типы электрических машин, используемых в прямых электроприводах – многополюсные синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ) и многополюсные синхронные редукторные реактивные машины (PPM) [5, 11, 57 – 61]. Отличительной особенностью данных машин является отношение диаметра ротора к его длине, большее единицы. Данная геометрия позволяет получить большие значения крутящего момента при малой массе. Называют такие двигатели моментными. Первые моментные двигателя появились в середине XX в.

Моментные двигатели состоят из статора и ротора и не имеют собственного корпуса, подшипников и датчиков/устройств обратной связи [43 – 46]. Большие значения внутреннего диаметра ротора в этих двигателях используются для размещения опор вращения, датчиков положения ротора и иной полезной нагрузки.

Пример конструкции поворотного стола на базе МД показан на рисунке 1.6 [75].



Рисунок 1.6 – Поворотный стол с моментным двигателем компании Etel: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – опора; 4 – датчик поворота

Внешние диаметры статоров МД [84 – 87] имеют значения от 60 мм до 2 м. Основные особенности МД – многополюсность и малая толщина ротора и статора. Используются МД в приложениях до 1000 об/мин. Максимальные крутящие моменты МД – 0,1 – 30 000 Н·м, однако более распространены МД с максимальными крутящими моментами 50 – 5000 Н·м.

Достоинства МД с постоянными магнитами:

- малые значения электромагнитных постоянных времени;

– максимальный крутящий момент в 2 – 4 раза превышает номинальный;

– удобный монтаж из-за больших воздушных зазоров (0,5 – 1,5 мм).

Недостаток МД на основе СМПМ – тяжело компенсируемый момент зубцовых пульсаций.

МД на базе PPM имеет большие значения электромагнитных постоянных времени по сравнению с МД на базе СМПМ.

МД в составе прямого электропривода станков, а именно узла поворота и наклона, обеспечивают хорошую жесткость и динамику, при этом имеют меньшие габариты по сравнению с редукторным электроприводом и лучшую компактность при установке в станки.

В таблице 1.2 показаны данные компании Etel [75] приводов прямых и с редукторами для поворотных столов. По основным параметрам прямой привод имеет преимущества над редукторным.

Прямой привод Показатель Привод с редуктором Время позиционирования, с 0.33 2.5 1 Повгоряемость позиционирования, угл. с 0,18 Разрешение обратной связи, угл. с 0.18 $7.2 \cdot 10^{6}$ $13 \cdot 10^{6}$ Статическая жесткость. Н • м/рад 97 % 100 % Цена

Таблица 1.2 – Параметры приводов поворотных столов

Неявнополюсные синхронные машины

На рисунке 1.7 представлена конструкция неявнополюсной синхронной машины [69 – 74]. Машина состоит из неподвижного статора с обмоткой питания и ротора с постоянными магнитами. Статор состоит из наружного корпуса, пакета статора с пазами и обмоткой, распределенной в этих пазах. На наружной поверхности ротора располагаются наклеенные постоянные магниты [79, 82 – 84].



Рисунок 1.7 – Конструкция неявнополюсной СМПМ

Типичные параметры неявнополюсных СМПМ для прямого электропривода производства компании Etel приведены в таблице 1.3. Меньшие скорости и ускорения соответствуют большим моментам.

Таблица 1.3 – Параметры неявнополюсных (СМПМ
--	------

Параметр	Конвекционное охлаждение	Жидкостное охлаждение
Диаметр статора, мм	120-1260	120-1260
Продолжительный момент, Н • м	1-5000	1-15 000
Пиковый момент, Н · м	15000	5-15 000
Максимальная допустимая частота враще- ния, об/мин	600-55	600—55
Угловое ускорение при продолжительном моменте, рад/с ²	10 000-170	10 000-500

Явнополюсные синхронные машины с постоянными магнитами

Статор явнополюсной СМПМ соответствует статору неявнополюсной машины [48 – 50]. Конструкция ротора отличается от неявнополюсной машины. Постоянные магниты в явнополюсной машине располагаются по радиусу и намагничены тангенциально, а соседние постоянные магниты имеют противоположную намагниченность. Между постоянными магнитами располагаются клинообразные магнитопроводы из ферромагнитного материала. В данной конструкции создается реактивный момент, в дополнение к магнитоэлектрическому.



Рисунок 1.8 – Внешний вид явнополюсной СМПМ (a) и конструкция ротора (б)

В качестве примера можно рассмотреть конструкцию двигателя ДБМ (рисунок 1.8). Постоянные магниты снаружи связаны немагнитной лентой, а по внутреннему радиусу соединены немагнитной втулкой. Ширина половины полюсасегмента меньше ширины постоянного магнита. Таким образом, магнитная индукция в рабочем зазоре в 2-3 раза больше, чем в постоянном магните. Получаем электрическую машину с увеличенным крутящим моментом из-за концентрации магнитного поля ротора, но при этом имеем более сложную конструкцию ротора [62, 67 – 68].

Редукторные реактивные машины (РРМ)

На рисунке 1.9 представлены конструкции редукторных реактивных синхронных машин [88 – 89]. Статор двигателя DDM 2225 выполнен в виде сборки отдельных модулей магнитопроводов Е-типа с катушкой питания и зубцами на полюсах. Подобная конструкция исключает взаимные индуктивные связи между фазами. Ротор имеет шихтованный магнтитопровод с зубцами на наружной поверхности. Принцип работы аналогичен работе шагового двигателя.

На рисунке 1.9(б) показана конструкция Megatorque компании NSK [90]. Для данной конструкции характерен номинальный момент до 250 Н⋅м. Отличительной особенностью данного двигателя является использование внутреннего объема электрического двигателя – размещение дополнительного (второго) статора. Таким образом, имеем два статора и два рабочих зазора и один ротор в виде полого цилиндра с зубцами на внутренней и внешней поверхности.



Рисунок 1.9 – Конструкции редукторных реактивных моментных двигателей: a – DDM 2225 компании Superior Electric; б – Megatorque компании NSK

1.2 Современное состояние конструирования электромагнитных передаточных устройств

В 1993 году авторами Кикучи (Kikuchi) и Тсурумото (Tsurumoto) предложен червячный вариант магнитного редуктора (см. рисунок 1.10). В данном варианте магнитного редуктора, как и в меха-

ническом червячном редукторе, валы роторов перпендикулярны друг другу. Магнитопровод статора в данной конструкции отсутствует, а роторы состоят из чередующихся магнитных полюсов. Данный редуктор имеет малый передаваемый момент из-за малого количества полюсов, находящихся в зацеплении.



Рисунок 1.10 – Магнитный червячный редуктор Kikuchi & Tsurumoto (1993 г.)



Рисунок 1.11 – Магнитный редуктор Патент США – 5,633,555 (1997 г.)

В конструкциях, предложенных Аккерманом и Хондсом (Ackerman & Honds, патент США № 5,633,555 (1997)), имеется проблема паразитной утечки магнитного поля по замкнутому магнитопроводу статора (см. рисунок 1.11). В конструкции от 1999 года (патент США №5,994,809, автор: Аккерман (Ackerman))

проблема с потоками утечки магнитного поля была решена вынесением статора наружу – роторы быстрого и медленного вращения расположены внутри коаксиально (см. рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – а) Магнитный редуктор. Патент США – 5,994,809 (1999 г.); б) Магнитный редуктор. Патент США – 687,292 (2001 г.)

На рисунке 1.12(б) показан современный вариант магнитного редуктора (патент США №687,292 (2001 г.)). Данная конструкция состоит из коаксиально расположенных роторов быстрого и медленного вращения, между которыми расположены ферромагнитные элементы статора. Ротор быстрого вращения содержит магнитопровод и расположенные снаружи чередующиеся редкоземельные постоянные магниты, намагниченные радиально. Ротор медленного вращения состоит из постоянных магнитов, размеры которых сравнимы с расстоянием между ферромагнитными элементами статора. Постоянные магниты ротора медленного вращения соращения снаружи объединены магнитопроводом.

Данная конструкции имеет хорошие массогабаритные показатели – рациональная магнитная система редуктора, а также использование редкоземельных постоянных магнитов позволяет передавать большой вращающий момент. На рисунке 1.13 показано торцевое исполнение данного редуктора (автор: Мезани (Mezani), 2006 г.). Достоинством данного редуктора является малая осевая длина. На рисунке 1.14 показан циклоидальный магнитный редуктор. Данный редуктор работает аналогично механическому циклоидальному редуктору – роль циклоидального диска и коронного кольца выполняет зацепление постоянных магнитов (см. рисунок 1.14 слева). Ведущий вал вращает эксцентриковый шарикоподшипник, который приводит в эксцентрическое, циклоидальное движение циклоидальный ротор. По ок-



Рисунок 1.13 – Магнитный редуктор. Торцевой вариант (Мезани, 2006 г.)

ружности на удалении от центра циклоидального ротора расположены отверстия. В эти отверстия вставлены стержни или ролики, закреплённые на диске. Через стержни и диск вращение передаётся выходному валу. Данная конструкция обладает наилучшим массогабаритным показателем среди рассмотренных конструкций.



Рисунок 1.14 – Магнитный редуктор – циклоидальный вариант

-28-

1.3 Основные задачи и пути их решения

Анализ литературы и современных технических решений позволяет сделать вывод о том, что традиционно взаимодействие между ротором и статором реализуется на двумерной поверхности, т.е. в одном рабочем зазоре. У крупных машин зубцы преимущественно выполнены также большими. Использование магнитной редукции в крупных машинах приводит к уменьшению размеров зубцов и рабочих зазоров, что ведет к недоиспользованию обмотки по МДС.

Сформулируем задачи, которые необходимо решить для получения электрических машин и электромагнитных устройств с улучшенными массогабаритными показателями.

1. Требуется разработать общие принципы и методологию построения конструктивных схем магнитных систем электрических машин и электромагнитных устройств, обеспечивающих максимальные значения крутящего момента и усилия при сохранении занимаемого объема и МДС обмоток питания или эквивалентной МДС постоянных магнитов.

Эти проблемы целесообразно решать с помощью решетчатых многослойных элементов магнитных систем.

2. Необходимо найти конструктивные решения (конфигурации) магнитных систем рабочих зон шаговых и синхронных реактивных двигателей, шаговых и синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов, магнитных редукторов, электромагнитных муфт и электромагнитов поступательного движения.

Искомые конструктивные решения могут быть получены на базе классических конструкций электрических машин и электромагнитных устройств путем разделения магнитного потока на мелкие струйки с их многократной деформацией на малых рабочих зазорах.

3. Необходимо найти основные расчетные соотношения и составить методику расчета для разработанных конструкций.

Расчетные соотношения должны базироваться на классических методах расчета электрических машин с учетом полученной геометрии магнитных систем и с сохранением подобия картины магнитных полей в машинах классических конструкций.

4. Требуется провести исследования по выбору оптимальных соотношений между параметрами магнитных систем с помощью компьютерных моделей и анализ магнитных систем с учетом нелинейности ферромагнитного материала магнитопроводов с помощью расчета магнитных полей.

Целесообразна вариация ширины зубцов, длины рабочего зазора, количества рабочих зазоров и сравнение с параметрами классических электрических машин и электромагнитных устройств. Для расчета магнитных полей рекомендуется применение современного программного обеспечения, основанного на методе конечных элементов.

5. Требуется проектирование и изготовление лабораторного макета электромагнитов с различным числом рабочих зазоров и проведение испытаний для подтверждения теоретических положений и результатов компьютерного моделирования.

Целесообразно изготовить рабочую зону (полюса, лайнер) съемными, для возможности сравнения различных подходов в увеличении усилия электромагнита, при сохранении основного магнитопровода и источника магнитного поля для чистоты эксперимента.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С МНОГОСЛОЙНЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ РОТОРА И СТАТОРА

В настоящей главе рассматриваются основные положения в подходе получения максимального усилия тяжения и максимального электромагнитного момента электрических машин и электромагнитных механизмов, имеющих определенный объем и массу. Известно, что электромагнитный момент и электромагнитное усилие зависят от различных параметров и факторов, но в данной работе рассматривались вопросы рациональной конструкции магнитной системы и ее размеров, остальные параметры и факторы считались неизменными.

2.1 Общие принципы построения электрических машин с многослойными магнитопроводами ротора и статора

В настоящее время усматривается противоречие, особенно в крупных электрических машинах: трехмерные магнитопровод и обмотки создают магнитное поле в одном рабочем зазоре, и электромагнитный момент возникает на двумерной цилиндрической поверхности. Для увеличения электромагнитного момента предлагается увеличить количество таких поверхностей взаимодействия, введя полые цилиндры ротора и статора, состоящие из чередующихся ферромагнитных и немагнитных элементов.

Рассмотрим предложенную идею на плоском варианте электромеханической системы [6 – 7]. На рис. 2.1, *а* показаны зубцы статора и лайнера (плоский вариант ротора) крупной электрической машины.

Касательная сила, возникающая при взаимодействии зубцов лайнера и статора, определяется по формуле

$$F_1 = S \frac{B^2}{2\mu_0},$$
 (2.1)

где *S* – площадь боковой поверхности зубцов, на которую действует сила магнитного тяжения; *B* – магнитная индукция; μ_0 – магнитная постоянная.



Рисунок 2.1 – Зона зазора машины:

а – без магнитной редукции; *б* – с магнитной редукцией;

в – с магнитной редукцией и двумя дополнительными пластинами

На рис. 2.1, δ представлена та же электрическая машина, но с реализацией принципа магнитной редукции. Количество зубцов увеличелось в три раз, но воздушный зазор и высота зубцов для сохранения картины магнитного поля уменьшены в три раза. Таким образом, касательное усилие и момент (в случае цилиндрической машины) на рис. 2.1, $a - \delta$ равны, а обмотки на рис. 2.1, δ недоиспользуются по магнитодвижущей силе (МДС).

На рис. 2.1, *в* представлены зубцы лайнера и статора той же крупной машины при применении принципа магнитной редукции и двухслойного статора и лайнера. Количество зубцов и магнитная индукция совпадают с рис. 2.1, *б*. При этом лайнер имеет пластину, высота которой в два раза превышает высоту зубца. Пластина содержит ферромагнитные элементы, чередующиеся с немагнитными элементами (не заштрихованы) и расположенные напротив зубцов лайнера. Статор содержит подобную пластину, ее ферромагнитные элементы расположены напротив зубцов статора. Воздушные зазоры равны зазорам на рис. 2.1, *б*, а суммарный зазор и площадь *S* в три раза больше. Приходим к выводу, что касательное усилие машины по рис. 2.1, *в* в три раза больше, чем по рис. 2.1, *а*, при тех же размерах, объеме, массе и МДС обмоток. При использовании двух пластин лайнера и двух пластин статора суммарное усилие возрастает в пять раз, т.к. при этом количество рабочих зазоров становится равным пяти. При тех же энергетических затратах, при тех же габаритах машины ее усилие (крутящий момент в цилиндрическом варианте) увеличивается в несколько раз.

Исходя из выше сказанного, вытекают следующие основные принципы построения конструкций различных видов электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными решетчатыми магнитопроводами:

- большие обмотки и большие полюса;
- выполнение нескольких малых рабочих зазоров;
- мелкие зубцы ротора (лайнера) и статора согласно принципам магнитной редукции;
- чередующиеся коаксиальные полые цилиндры ротора (пластины лайнера) и статора, состоящие из чередующихся ферромагнитных и немагнитных элементов.

Следует отметить, что в плоском варианте суммарное усилие, создаваемое взаимодействием статора и ротора посредством магнитного поля, равно сумме усилий, создаваемых каждым рабочим зазором, т.е.

$$F = nmF_1, (2.2)$$

где *F* – полное усилие; *F*₁ – усилие, создаваемое одной парой ферромагнитных элементов; *n* – количество рабочих зазоров; *m* – количество зубцов.

2.2 Основные конструктивные схемы и соотношения

Ниже представлены электрические машины с многослойными решетчатыми магнитопроводами роторов и статоров. Показаны конструкции:

- линейного шагового электродвигателя;

- шагового электродвигателя;

- синхронного электродвигателя с реактивным ротором;

электромагнитной муфты;

- магнитного редуктора;

– электромагнита.

Приведены соотношения для расчета втяжного усилия и крутящего момента для данных многослойных решетчатых магнитных систем. Для учета явления насыщения ферромагнитных материалов в цилиндрических электрических машинах приведены соответствующие зависимости. Анализ полученных результатов показывает возможность увеличения момента (усилия) электрических машин и электромагнитных устройств в 2-3,5 раза при сохранении габаритных размеров и массы.

2.2.1 Линейный шаговый электродвигатель

Конструктивная схема

Линейный шаговый электродвигатель является электрическим двигателям с поступательным дискретным движением. Данный тип двигателей используется в электромеханических системах с шаговым поступательным движением исполнительного механизма и для построения разомкнутых позиционных систем.



Рисунок 2.2 – Продольное сечение линейного

шагового электродвигателя

-34-

Сущность линейного шагового электродвигателя с многослойным магнитопроводом поясняется на рисунках 2.2–2.4



Рисунок 2.3 – Поперечное сечение линейного шагового электродвигателя

Здесь: 1 – основные магнитопроводы статора, 2 – широкие стержни, 3 – узкие стержни, 4 – постоянные магниты, 5 – двухфазная обмотка, 6 – пластины лайнера, 7 – пластины статора, 8 – дополнительный магнитопровод, 9, 10 – немагнитные пластины, 11 – корпус.

Шаговый двигатель [37, 38] имеет основные шихтованные магнитопроводы с ярмами статора 1, с широкими стержнями 2 и с узкими стержнями 3, высококоэрцитивные постоянные магниты 4, двухфазную обмотку 5 с фазами *A* и *B*, пластины лайнера 6, пластину статора 7, дополнительный шихтованный магнитопровод 8, немагнитные пластины 9, 10, корпус 11.

На стержнях 2, 3 имеются коронки с зубцами, обращенными к рабочему воздушному зазору. На магнитопроводе 8 имеются аналогичные зубцы. Пластина 7 состоит из ферромагнитных и немагнитных элементов. Она механически связана со статором немагнитной пластиной 9. Зубцы на стержнях 2, 3, зубцы магнитопровода 8 и ферромагнитные элементы пластины 7 имеют одинаковое линейное расположение.

Пластины 6 состоят из ферромагнитных и немагнитных элементов. Ферромагнитные элементы расположены на одинаковом расстоянии друг от друга, которое определяет зубцовый шаг. Пластины 6 механически связаны с немагнитным элементом 10 и образуют лайнер.

Зубцы широкого 2 и тонких 3 стержней одного магнитопровода смещены относительно друг друга на половину зубцового деления. Зубцы двух соседних широких стержней смещены на четверть зубцового деления относительно друг друга. Обмотки фазы *A* и *B* расположены поочередно на широких стержнях. Соседние постоянные магниты 4 намагничены тангенциально и встречно.

Основные магнитопроводы 1, 2, 3 и дополнительный магнитопровод 8 установлены в корпусе 11.

Принцип действия

Шаговый двигатель работает следующим образом [73]. Магнитное поле в рабочих зазорах (на рисунке 2.2 их четыре) создается совместным действием постоянных магнитов и тока одной из фаз. Постоянные магниты создают магнитный поток, направленный вверх в стержнях фазы *A* и направленный вниз в стержнях фазы *B*.

При подаче положительного импульса напряжения на фазу A (см. рисунок 2.4) магнитный поток широкого стержня возрастает, а потоки узких стержней уменьшаются. В результате лайнер занимает положение, при котором зубцы широкого стержня фазы A, зубцы магнитопровода 8 и соответствующие ферромагнитные элементы пластин 6, 7 расположены друг против друга. При этом магнитная проводимость потока широкого стержня максимальна. Это положение лайнера показано на рисунке 2.2.

При подаче положительного импульса напряжения на фазу *В* магнитный поток ее широкого стержня уменьшается, а потоки узких стержней возрастают. В результате лайнер займет положение, при котором зубцы узких стержней фазы *B*,
зубцы магнитопровода 8 и соответствующие ферромагнитные элементы пластин 6, 7 расположены друг против друга. При этом магнитная проводимость потоков узких стержней максимальна. Лайнер сдвинется на четверть зубцового деления.



Рисунок 2.4 – Графики напряжений питания фаз обмоток

При подаче отрицательного импульса напряжения на фазу *A* магнитный поток ее широкого стержня уменьшается, а потоки узких стержней возрастают. В результате лайнер займет положение, при котором зубцы узких стержней фазы *A*, зубцы магнитопровода 8 и соответствующие ферромагнитные элементы пластин 6, 7 расположены друг против друга. При этом магнитная проводимость потоков узких стержней максимальна. Лайнер сдвинется еще на четверть зубцового деления, и т.д.

Для реверса следует изменить порядок чередования фаз. После положительного импульса напряжения фазы A нужно подать отрицательный импульс напряжения на фазу B, далее отрицательный импульс на фазу A, затем положительный импульс на фазу B и т.д. Это показано на рисунке 2.4 правее штриховой линии.

Эффективность предлагаемой конструкции шагового двигателя объясняется разделением магнитных потоков широких и узких стержней на несколько частей и их многократным использованием в нескольких рабочих зазорах. В приведен-

ном варианте электромагнитная сила возрастает в 4 раза по сравнению с обычным шаговым двигателем с магнитной редукцией.

Основные расчетные соотношения

Рассмотрим основные соотношения для расчета усилия, создаваемого линейным многослойным шаговым электродвигателем.

Сила, действующая на один ферромагнитный элемент лайнера со стороны одного зазора, определяется формулой

$$F_1 = \frac{U_m^2}{2} \frac{d\Lambda}{dx}; \quad \Lambda = \mu_0 \frac{lx}{\delta}; \qquad U_m = H\delta = \frac{B\delta}{\mu_0}.$$
 (2.3)

Здесь F_1 – сила; U_m – магнитное напряжение на зазоре; Λ – магнитная проводимость; l – активная длина элемента; x – перемещение лайнера; μ_0 – магнитная постоянная; δ – длина воздушного зазора; H – напряженность магнитного поля в зазоре; B – магнитная индукция в зазоре.

Дифференцируя проводимость Λ по *x*, получаем:

$$F_1 = \frac{B_1 H_1}{2} \delta l; \qquad F_{1\Sigma} = m n \frac{B_1^2}{2\mu_0} \delta l;$$
 (2.4)

$$F_2 = \frac{B_2 H_2}{2} \delta l; \qquad F_{2\Sigma} = m n \frac{B_2^2}{2\mu_0} \delta l.$$
 (2.5)

Здесь m – число элементов под широкими стержнями одной возбужденной фазы или под малыми стержнями той же фазы; n – число рабочих зазоров; B_1 , H_1 – магнитная индукция и напряженность магнитного поля под широкими стержнями возбужденной фазы; F_1 , $F_{1\Sigma}$ – усилие на элемент под широким стержнем со стороны одного зазора и суммарное усилие на все элементы под широкими стержнями возбужденной фазы; B_2 , H_2 – магнитная индукция и напряженность магнитного поля под узкими стержнями той же фазы; F_2 , $F_{2\Sigma}$ – усилие на элемент под узким стержнем со стороны одного зазора и суммарное усилие на все элементы под узкими стержнями той же фазы.

Усилия $F_{1\Sigma}$ и $F_{2\Sigma}$ направлены в разные стороны. Результирующее усилие определяется выражениями

$$F_{\Sigma} = F_{1\Sigma} - F_{2\Sigma} = \frac{mn\delta l}{2\mu_0} (B_1^2 - B_2^2) = \frac{mn\delta l}{\mu_0} \frac{B_1 + B_2}{2} (B_1 - B_2).$$
(2.6)

С учетом равенств

$$Iw = n(H_1 - H_2)\delta, \quad B_m = \frac{B_1 + B_2}{2}$$
 (2.7)

получаем выражение для результирующей силы:

$$F_{\Sigma} = m l B_m I w, \tag{2.8}$$

где Iw – МДС одной фазы; B_m – магнитная индукция в зазоре, созданная постоянным магнитом. Из последней формулы видно, что с увеличением количества элементов *m* под широкими стержнями одной фазы пропорционально возрастает суммарное усилие. При увеличении *m* ширина одного элемента уменьшается, что требует соответственного уменьшения толщины одной пластины, уменьшения зазора δ и увеличения количества зазоров *n* при фиксированной МДС фазы *Iw*.

Теоретически можно получить неограниченно большое усилие, увеличивая число пластин при одновременном уменьшении их толщины, зазоров и ширины пластин, имея фиксированный объем электродвигателя и постоянную МДС одной фазы.

Динамические характеристики линейного шагового электродвигателя выше благодаря выполнению лайнера в виде нескольких пластин, через которые магнитный поток проходит перпендикулярно и транзитом. Малая масса лайнера допускает большие линейные ускорения.

Таким образом, введением дополнительных пластин лайнера и статора из чередующихся ферромагнитных и немагнитных элементов, а также введением дополнительного магнитопровода статора получен линейный шаговый электродвигатель с усилием, увеличенным в несколько раз, но при сохранении габаритных размеров, и с высокими динамическими показателями.

2.2.2 Шаговый электродвигатель

Конструктивная схема

Шаговый электродвигатель с реактивным ротором является электрическим двигателям с вращательным дискретным движением. Данный тип электродвигателей может быть использован в промышленных, транспортных и приборных электромеханических системах с дискретным движением механизмов.



Рисунок 2.5 – Поперечное сечение шагового реактивного электродвигателя с многослойным ротором и статором

Конструкция многослойного шагового электродвигателя [34] показана на рисунках 2.5–2.7. Здесь: 1 – корпус, 2 – пакет статора, 3 – многофазная обмотка, 4 – магнитопровод ротора, 5 – вал, 6 – полые цилиндры ротора, 7 – полые цилиндры статора, 8 – ферромагнитные элементы полых цилиндров статора и ротора, 9 – немагнитные элементы полых цилиндров статора и ротора, 10 – немагнитный диск, 11 – втулка немагнитная, 12 – статор, 13 – ротор.

В корпусе 1 установлен пакет статора 2, который имеет полюсы и на каждом из них расположена одна из фаз обмотки 3 – *A*, *B* и *C*. Полюса имеют зубцы, которые сдвинуты на одну треть зубцового деления. На валу 5 установлен магнитопровод ротора 4, который имеет зубцы, обращенные к зубцам полюсов статора. Угловые размеры и зубцовый шаг зубцов ротора совпадают с зубцами статора. Между магнитопроводом ротора и полюсами статора введены полые цилиндры ротора 6 и статора 7. Полые цилиндры ротора соединены с магнитопроводом ротора немагнитным диском 10. Полые цилиндры статора соединены со статором немагнитной втулкой 11. Угловые размеры и положения ферромагнитных элементов полых цилиндров ротора совпадают с размерами и положениями зубцов ротора, а угловые размеры и положения ферромагнов полых цилиндров статора совпадают с размерами и положентов полых ци-



Рисунок 2.6 – Продольное сечение многослойного шагового электродвигателя

На рисунке 2.7 показана область магнитной системы двигателя, на которой представлены силовые линии магнитного потока, проходящего через ротор 13 и статор 12.



Рисунок 2.7 – Многослойная рабочая зона

Принцип действия

Шаговый двигатель (ШД) работает следующим образом [53 – 55]. При подаче импульса напряжения на фазу *A* (см. рисунок 2.8) возникает магнитный поток, проходящий по соответствующим полюсам статора 2. Зубцы магнитопровода 4 ротора и ферромагнитные элементы 8 его полых цилиндров 6 притягиваются к зубцам и ферромагнитным элементам 8 полых цилиндров статора 7, расположенных напротив полюсов с фазой *A*.



Рисунок 2.8 – Напряжения питания шагового электродвигателя

При подаче импульса напряжения на фазу *В* возникает магнитный поток, проходящий по полюсам с этой фазой. Зубцы магнитопровода 4 ротора и ферромагнитные элементы 8 его полых цилиндров 6 притягиваются к зубцам и ферромагнитным элементам 8 полых цилиндров статора 7, расположенных напротив полюсов с фазой *B*. При этом ротор поворачивается по часовой стрелки на угол,

равный одной трети углового зубцового деления. Затем импульс напряжения подается на фазу *C*, потом на фазы *A*, *B*, *C* и т.д. Для обратного вращения следует поменять порядок чередования фаз, т.е. подавать импульсы в порядке *C*, *B*, *A*, *C*, *B*, *A*.

Основные расчетные соотношения

Момент, возникающий при взаимодействии одной пары зубцов, определяется формулами [18]

$$M_1 = \frac{U_{\delta}^2}{2} \frac{d\Lambda}{d\alpha}; \quad U_{\delta} = \frac{B_{\delta}\delta}{\mu_0}; \tag{2.9}$$

$$\Lambda = \frac{\mu_0 RL\alpha}{\delta}; \quad M_1 = \frac{B_\delta^2 \delta RL}{2\mu_0}, \tag{2.10}$$

где U_{δ} – магнитное напряжение на зазоре; Λ – магнитная проводимость; α – угол поворота ротора; B_{δ} – магнитная индукция в зазоре; δ – зазор; μ_0 – магнитная постоянная; R – радиус на зазоре; L – активная длина двигателя.

Выразим длину рабочего зазора, используя коэффициент *k*_δ:

$$\delta = \frac{R}{k_{\delta}}, k_{\delta} = \text{const.}$$
(2.11)

С учетом данного коэффициента момент взаимодействия одной пары зубцов будет равен

$$M_1 = \frac{B_{\delta}^2 R^2 L}{2\mu_0 k_{\delta}}.$$
 (2.12)

Тогда момент на зазорах одного радиуса под 2-мя полюсами равен

$$M_{2p} = \frac{z_{\Pi} p B_{\delta}^2 R^2 L}{\mu_0 k_{\delta}},$$
(2.13)

где z_{Π} – количество зубцов полюса статора, p – количество пар полюсов.

В пределах одного полюса через все слои проходит один и тот же магнитный поток. Поэтому произведение $B_{\delta}R$ = const для всех зазоров и суммарный момент равен

$$M = nM_{2p}, \quad n = 2m + 1, \quad (m = 0, 1, 2, ...), \tag{2.14}$$

где *n* – количество зазоров; *m* – количество полых цилиндров ротора.

На наружном рабочем зазоре, с учетом насыщения ферромагнетика,

$$R = R_R; \quad B_{\delta 1} = \frac{R_R - 2mh}{R_R} B_{\delta max}, \tag{2.15}$$

где R_R – наружный радиус ротора; $B_{\delta 1}$ – магнитная индукция на радиусе R_R ; h – толщина полого цилиндра; $B_{\delta \max}$ – максимальное значение магнитной индукции.

Тогда полный момент будет равен

$$M = z_{\Pi} p (2m+1) (R_R - 2mh)^2 \frac{B_{\delta max}^2 L}{\mu_0 k_{\delta}}.$$
 (2.16)

Проведенные расчеты показали, что для данного шагового двигателя можно подобрать оптимальное количество полых цилиндров, т.к. при большем их количестве происходит уменьшение момента, вместо ожидаемого увеличения. При выборе оптимального количества полых цилиндров было получено увеличение момента в 3-4 раза по сравнению с двигателем, имеющим те же интегральные параметры, но содержащим один зазор.



Рисунок 2.9 – Зависимость M = f(m)

2.2.3 Синхронный электродвигатель с реактивным ротором

Конструктивная схема

Синхронный электродвигатель с реактивным ротором является электрическим двигателям вращательного движения с обмоткой на статоре и ферромагнитным ротором. Данный тип электродвигателей может быть использован в промышленных, транспортных и приборных электромеханических системах с непрерывным вращением.

На рисунках 2.10 – 2.11 представлен синхронный реактивный двигатель [33, 35, 41] с многослойными ротором и статором, т.е. с введенными полыми цилиндрами ротора и статора.



Рисунок 2.10 – Поперечное сечение трехфазного синхронного электродвигателя Здесь: 1 – корпус, 2 – пакет статора, 3 – обмотка многофазная, 4 – магнитопровод ротора, 5 – вал, 6 – полые цилиндры ротора, 7 – полые цилиндры статора, 8 – ферромагнитные элементы полого цилиндра статора и ротора, 9 – немагнит-

ные элементы полого цилиндра статора и ротора, 10 – диск немагнитный, 11 – втулка немагнитная, 12 – статор, 13 – ротор, 14 – пакет статора двигателя поступательного движения, 15 – лайнер, 16 – пластина статора, 17 – пластина лайнера.



Рисунок 2.11 – Продольное сечение трехфазного синхронного электродвигателя (слева) с участком рабочей зоны (справа)

В корпусе 1 установлен пакет статора 2, который имеет зубцы. Трехфазная обмотка 3 установлена в пазах статора. На валу 5 расположен магнитопровод 4, имеющий зубцы на наружной поверхности. Количество зубцов ротора $z_p = z_c \pm 2p$, где z_c – количество зубцов статора, p – число пар полюсов. Чередующиеся коаксиальные полые цилиндры ротора 6 и статора 7 введены между зубцами ротора и статора. Полые цилиндры ротора соединены с магнитопроводом ротора немагнитным диском 10, а полые цилиндры статора соединены немагнитной втулкой 11 со статором. Коаксиальные цилиндры содержат чередующиеся ферромагнитные и немагнитные элементы. Угловые размеры ферромагнитных элементов полых цилиндров статора и ротора равны угловым размерам зубцов статора и ротора соответственно.

Принцип действия

Синхронный двигатель работает следующим образом [8, 16, 33]. На обмотку статора 3 подается трехфазная система напряжений, создающая вращающееся магнитное поле в пакете статора 2. Магнитный поток, проходя через зубцы стато-

ра и ферромагнитные элементы его полых цилиндров 7, притягивает к себе зубцы магнитопровода 4 и ферромагнитные элементы полых цилиндров 6 ротора. Таким образом, происходит равномерное вращение ротора двигателя.

Основные расчетные соотношения

Определим момент, создаваемый двигателем.

Момент, возникающий при взаимодействии одной пары зубцов статора и ротора (рисунок 2.12, а), определится формулами

$$M_1 = \frac{U_{\delta}^2}{2} \frac{d\Lambda}{d\alpha}; \quad U_{\delta} = \frac{B_{\delta}\delta}{\mu_0}; \quad \Lambda = \frac{\mu_0 R l \alpha}{\delta}; \quad M_1 = \frac{B_{\delta}^2 \delta R l}{2\mu_0}, \tag{2.17}$$

где U_{δ} – магнитное напряжение на зазоре; Λ – магнитная проводимость; α – угол поворота ротора; B_{δ} – магнитная индукция в зазоре; δ – зазор; μ_0 – магнитная постоянная; R – радиус на зазоре; l – активная длина двигателя.



Рисунок 2.12 – Развертка рабочей зоны синхронного реактивного двигателя: a) – рабочая зона с одним рабочим зазором; б) – рабочая зона с тремя рабочими зазорами

Магнитная индукция и ее квадрат на одном зазоре распределяются по законам

$$B_{\delta}(x) = B_m \sin \frac{\pi x}{\tau}; \quad B_{\delta}^2(x) = \frac{B_m^2}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{\tau} \right),$$
 (2.18)

где B_m — максимальное значение магнитной индукции на зазоре данного радиуса; τ — полюсное деление.

Запишем функцию (см. рисунок 2.13), которая показывает положительное и отрицательное направление момента [21]

$$h(x) = \operatorname{sign}\left(\sin\frac{2\pi}{\tau}(x - x_0)\right). \tag{2.19}$$

Таким образом, среднее значение квадрата магнитной индукции равно

$$B_{cp}^{2} = \frac{1}{\tau} \int_{0}^{\tau} B_{\delta}^{2}(x) h(x) dx = \frac{1}{\tau} \int_{0}^{\tau} \frac{B_{m}^{2}}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{\tau} \right) h(x) dx = \frac{B_{m}^{2}}{\pi}.$$
 (2.20)
$$B_{m}^{2} \qquad 0 \qquad \frac{\tau}{2} \qquad \frac{\tau}{2} \qquad \frac{3\tau}{2} \qquad \frac{2\tau}{B_{\delta}(x)}$$

Рисунок 2.13 – Графики положительной и отрицательной работы зубцов На одну пару зубцов статора и ротора среднее значение момента равно

$$M_{\rm lcp} = \frac{B_m^2 \delta lR}{2\pi\mu_0}.$$

Радиус зазора и длина зазора соотносятся выражением $k_{\delta} = \frac{R}{\delta}$, где k_{δ} – коэффициент постоянный. Данный коэффициент k_{δ} используется для обеспечения подобия распределения магнитного поля между ферромагнитными элементами на различных рабочих зазорах.

Выразим длину рабочего зазора используя коэффициент k_{δ}

$$\delta = \frac{R}{k_{\delta}}.$$
(2.21)

Тогда момент на зазорах одного радиуса найдется по формуле

$$M_{i} = 2 p z M_{1 cp} = \frac{p z B_{m}^{2} R^{2} l}{\pi \mu_{0} k_{\delta}},$$
(2.22)

где *p* – количество пар полюсов; *z* – количество зубцов на одном полюсе.

В пределах одного полюса произведение *B_mR* одинаково для всех зазоров и полный момент определяется выражением

$$M = nM_i, \quad n = 2m + 1, \quad (m = 0, 1, 2, ...), \tag{2.23}$$

где *n* – число зазоров (см. рисунок 2.12, б); *m* – число слоев ротора.

На внешнем зазоре, с учетом насыщения ферромагнетика на внутреннем зазоре $R_{\rm BH} = R_0 - 2mh$,

$$R = R_0; \quad B_{m0} = \frac{R_0 - 2mh}{R_0} B_{max}, \qquad (2.24)$$

где *h* – толщина слоя; *B*_{max} – максимальное значение магнитной индукции для данного ферромагнетика.

Тогда полный момент будет равен

$$M = (2m+1)(R_0 - 2mh)^2 \frac{B_{\max}^2 zl}{\pi \mu_0 k_\delta}.$$
 (2.25)

На рисунке 2.14 показаны графики относительного момента для синхронного двигателя с реактивным многослойным ротором при различном количестве *n* введенных полых цилиндров ротора и статора с учетом насыщения ферромагнетика (на рисунке 2.14 *R* – радиус расточки статора, *h* – толщина кольца).



Количество зазоров, n = 2m + 1

Рисунок 2.14 – Зависимость относительного момента от количества зазоров

При оптимальном количестве введенных полых цилиндров статора и ротора можно получить увеличение момента в 3-3,5 раза по сравнению с классической электрической машиной, имеющей те же габариты, те же потери мощности и один рабочий зазор.

2.2.4 Электромагнитная муфта

Конструктивная схема

Электромагнитная муфта относится к электромагнитным передаточным устройствам и может быть использована для дистанционного управления сцеплением валов при ударной нагрузке и большом передаваемом моменте. Конструктивная схема многослойной электромагнитной муфты показана на рисунках 2.15 – 2.17.



Рисунок 2.15 – Конструктивная схема электромагнитной муфты

Электромагнитная муфта [39] имеет тороидальный магнитопровод 1, кольцевую обмотку управления 2, немагнитную втулку 3 ведущего вала 11, диски ведущего вала 4, диски ведомого вала 5, немагнитную втулку 6 ведомого вала 7, толстый диск ведущего вала 8, диск ведомого вала 9, немагнитную втулку 10 ведущего вала 11.

Сечение дисков 5 ведомого вала показано на рисунке 2.16. Они имеют чередующиеся ферромагнитные и немагнитные сектора. Ферромагнитные сектора показаны штриховкой. Диски 4 ведущего вала имеют аналогичную конструкцию. Самый левый диск 8 ведущего вала имеет большую толщину, так как он выполняет еще и силовую функцию. Через него передается входной момент, который распределяется по всем дискам. Этот диск имеет слева плоскую поверхность, а справа выступы, повторяющие геометрию ферромагнитных секторов. Толщина выступов в два раза меньше, чем толщина других дисков. Аналогично самый правый диск 9 ведомого вала имеет плоскую правую поверхность, а слева выступы, повторяющие геометрию ферромагнитных секторов. Толщина выступов в два раза меньше, чем толщина других дисков. Толщина выступов



Рисунок 2.16 – Сечение диска ведомого вала



Рисунок 2.17 – Продольный разрез электромагнитной муфты и диски валов медленного и быстрого вращения

Принцип действия

Электромагнитная муфта работает следующим образом [9, 10]. При подаче напряжения на обмотку 2 возникает магнитный поток, средняя силовая линия которого показана штриховой линией. Магнитный поток проходит через диски ведущего и ведомого валов в осевом направлении. Диски стремятся занять положение, при котором магнитный поток и магнитная проводимость максимальны. Это наблюдается, когда магнитные секторы дисков ведущего и ведомого валов находятся напротив друг друга.

В отсутствии момента нагрузки на ведомом валу 7 диски вращаются синхронно и синфазно. При увеличении момента нагрузки увеличивается угол рассогласования между ведущим и ведомым валами, т. е. получается упругая передача момента. Максимальный передаваемый момент зависит от числа ферромагнитных секторов на одном диске, от числа рабочих зазоров между дисками и от среднего радиуса взаимодействия, а также от магнитной индукции в рабочих зазорах.

Основные расчетные соотношения

Площадь одного ферромагнитного сектора диска определяется формулой

$$S_{\rm I} = \frac{\pi \left(R^2 - r^2\right)\gamma}{2\pi},$$
 (2.26)

где *R* – наружный радиус; *r* – внутренний радиус ферромагнитного элемента, *γ* – угол одного сектора.

Если магнитные элементы двух дисков расположены друг против друга, то магнитная проводимость между дисками дается формулой

$$\Lambda_1 = \frac{\mu_0 S}{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{(R^2 - r^2)\alpha}{2},$$
(2.27)

где µ₀ – магнитная постоянная; δ – зазор между дисками, *S* – площадь перекрытия двух секторов дисков входного и выходного вала.

Угол одного сектора

$$\gamma = \frac{\pi}{n},\tag{2.28}$$

где *n* – число ферромагнитных секторов одного диска.

Определим отношение средней длины дуги сектора диска к длине рабочего зазора некоторым постоянным значением.

$$k = \frac{\gamma R_{\rm cp}}{\delta} = \frac{\pi (R+r)}{2n\delta}, \ k = {\rm const},$$
(2.29)

где R_{cp} – средний радиус секторов дисков.

Электромагнитный момент, возникающий при взаимодействии двух секторов, определяется формулой

$$M_{1} = \frac{U_{\delta}^{2}}{2} \frac{d\Lambda_{1}}{d\alpha}, \quad M_{1} = \frac{U_{\delta}^{2}}{2} \frac{\mu_{0}}{\delta} \frac{(R^{2} - r^{2})}{2}, \quad M_{1} = \frac{B_{\delta}^{2}(R^{2} - r^{2})\delta}{4\mu_{0}}, \quad (2.30)$$

где U_{δ} – магнитное напряжение в одном рабочем зазоре, B_{δ} – магнитная индукция в рабочем зазоре.

Электромагнитный момент одного рабочего зазора M_m и полный момент *М* определяются выражениями:

$$M_m = \frac{nB_{\delta}^2(R^2 - r^2)\delta}{4\mu_0}; \qquad (2.31)$$

$$M = \frac{mnB^2\delta(R^2 - r^2)}{4\mu_0},$$
(2.32)

где *т* – количество рабочих зазоров.

Заменим произведение *n*б через постоянный коэффициент *k*. Тогда формула момента примет следующий вид

$$M = \frac{m\pi B^2 (R^2 - r^2)(R + r)}{8k\mu_0} = \frac{m\pi B^2 (R^2 - r^2)R_{\rm cp}}{4k\mu_0}.$$
 (2.33)

Из последней формулы видно, что передаваемый момент зависит от числа рабочих зазоров между дисками и от среднего радиуса взаимодействия, а также от магнитной индукции в рабочих зазорах. Чем больше рабочих зазоров, тем меньше

длина рабочего зазора между двумя дисками и тем больше количество секторов диска, следовательно, больше передаваемый момент.

2.2.5 Магнитный редуктор

Конструктивная схема

Магнитный редуктор относится к бесконтактным передаточным механизмам и может быть использован в качестве передаточного устройства в механических системах, требующих длительный ресурс работы, бесшумность и возможность работы с ударными нагрузками.



Рисунок 2.18 – Поперечное сечение магнитного редуктора

Конструктивная схема многослойного магнитного редуктора [17, 19, 40] показана на рисунках 2.18 – 2.20. Здесь: 1 – постоянные магниты, 2 – магнитопровод клинообразный, 3 – втулка немагнитная, 4 – вал входной (быстрого вращения), 5 – магнитопровод с зубцами статора, 6 – корпус, 7 – полые цилиндры статора, 8 – полые цилиндры выходного ротора (ротора медленного вращения), 9 – вал выходной, 10 – кольцо немагнитное, 11 – диск немагнитный.



Рисунок 2.19 – Сечение продольное редуктора магнитного

Ротор входного вала (ротор быстрого вращения) содержит источник магнитного поля магнитного редуктора, состоящий из клинообразных магнитопроводов 2 и расположенных между ними постоянных магнитов 1 (например, высококоэрцитивных). Постоянные магниты намагничены тангенциально и расположены одноименными полюсами друг к другу. Магнитопроводы и постоянные магниты соединены с валом быстрого вращения 4 немагнитной втулкой 3.

Статор состоит из магнитопровода статора 5, на внутренней поверхности которого имеются зубцы, и из полого цилиндра статора 7. Полый цилиндр статора крепится к корпусу 6 с помощью немагнитного кольца 10. Ротор медленного вращения содержит полые цилиндры 8, соединенные с выходным валом немагнитным диском 11. Полые цилиндры ротора медленного вращения и статора состоят из чередующихся ферромагнитных и немагнитных элементов.

Ферромагнитные элементы полых цилиндров ротора медленного вращения и статора имеют одинаковые угловые размеры. Угловое положение зубцов статора и ферромагнитных элементов полого цилиндра статора совпадает. Количество ферромагнитных элементов полого цилиндра ротора медленного вращения и полого цилиндра статора отличается на единицу в пределах одного полюсного деления.

Принцип действия

Принцип работы магнитного редуктора аналогичен принципу работы синхронного реактивного двигателя, за исключением того, что волна магнитной индукции создается индуктором входного ротора, а не обмоткой статора[4, 5, 42]. Постоянные магниты индуктора входного вала через клиновидные магнитопроводы создают в рабочих зазора магнитную индукцию, близкую к синусоидальной (см. рисунок 2.20). В середине клиновидных магнитопроводов значение магнитной индукции максимальное, а напротив середин постоянных магнитов равно нулю.



Рисунок 2.20 – Волна магнитной индукции и развертка полых цилиндров

При вращении индуктора со скоростью ω₁, созданное им магнитное поле вращается с такой же скоростью. При отсутствии момента нагрузки ферромагнитные элементы полых цилиндров ротора медленного вращения будут занимать положение напротив ферромагнитных элементов полого цилиндра и зубцов статора в зоне максимума магнитной индукции в рабочем зазоре. В зоне же нейтралей ферромагнитные элементы полых цилиндров ротора медленного вращения располагаются напротив немагнитных элементов полого цилиндра и зубцов статора.

Передаточное отношение магнитного редуктора соответствует количеству ферромагнитных элементов полого цилиндра ротора медленного вращения, приходящемуся на одно полюсное деление индуктора. Таким образом, при повороте ротора входного вала на одно полюсное деление ротор медленного вращения повернется на одно зубцовое деление.

На рисунке 2.20 представлена волна магнитной индукции $B(\beta)$ и развертка в полых цилиндров ротора медленного вращения и статора. Ферромагнитные элементы полого цилиндра статора и зубцы магнитопровода статора неподвижны. В зоне максимума амплитуды магнитной индукции все ферромагнитные элементы и зубцы расположены друг против друга.

Основные расчетные соотношения

Ферромагнитные элементы полых цилиндров 8, связанных с ротором медленного вращения, в зонах нейтралей, соответствующих серединам магнитов 1, расположены напротив немагнитных элементов полого цилиндра 7 и напротив пазов на магнитопроводе 5. При вращении ротора быстрого вращения на одно полюсное деление, полюсы *N* и *S* поменяются местами, а полые цилиндры 8 повернутся на один ферромагнитный элемент (на зубцовое деление). На рисунке 2.20 показан случай, когда передаточное отношение редуктора равно 8, т.е. ротор медленного вращения вращается со скоростью

$$\omega_2 = \omega_1 / 8. \tag{2.34}$$

Передаточное отношение редуктора равно

$$i = \frac{Z_{\text{p.M.B.}}}{Z_{\text{p.M.B.}} - Z_{\text{c}}},$$
 (2.35)

где *z*_{р.м.в.} – количество ферромагнитных элементов полого цилиндра ротора медленного вращения; *z*_с – количество ферромагнитных элементов полого цилиндра статора.

Момент, возникающий при взаимодействии одной пары зубцов ротора медленного вращения и статора [2], равен

$$M_1 = \frac{B_\delta^2 R l \delta}{2\mu_0},\tag{2.36}$$

где *B*_δ – магнитная индукция в рабочем зазоре, *R* – средний радиус рабочего зазора, *l* – активная длина редуктора, δ – длина рабочего зазора, μ₀ – магнитная постоянная.

Магнитная индукция в рабочей зоне магнитного редуктора имеет синусоидальный вид (см. рисунок 2.20), а распределение ферромагнитных элементов ротора медленного вращения и статора соответствует распределению ферромагнитных элементов ротора и статора синхронного электродвигателя с многослойными ротором и статором. Таким образом, расчет суммарного момента ротора медленного вращения может быть рассчитан по аналогии с вышеприведенным расчетом момента многослойного ротора синхронного электродвигателя с реактивным ротором. За исключением того, что распределение магнитного поля от индуктора (ротора быстрого вращения) идет в обратном направлении – от внутренних рабочих зазоров к наружному статору.

С учетом вышесказанного, суммарный момент равен

$$M = (2m+1)(R_0 - 2mh)^2 \frac{B_{\max}^2 zl}{\pi \mu_0 k_\delta},$$
(2.37)

где *m* – число полых цилиндров ротора медленного вращения; *h* – толщина полого цилиндра; *R*₀ – наружный рабочий зазор; *B*_{max} – максимальное значение магнитной индукции для данного ферромагнетика; *z* – количество зубцов на одном полюсе; *l* – активная длина редуктора; k_{δ} – постоянный коэффициент $\left(k_{\delta} = \frac{R}{\delta}\right)$.

Зависимость момента ротора медленного вращения от количества полых цилиндров ротора медленного вращения аналогична приведенным графикам на рисунке 2.14. При оптимальном количестве полых цилиндров ротора медленного вращения возможно увеличение передаваемого момента в 2 – 3,3 раза по сравнению с редуктором с одним рабочим зазором.

Упругость передачи является недостатком данного редуктора. Вал медленного вращения отстает на некоторый угол от положения, соответствующего холостому ходу, при увеличении момента нагрузки на нем.

Связь между валами осуществляется через магнитное поле, что обеспечивает отсутствие механических контактов между подвижными частями, бесшумность в работе, большой срок службы, определяемый подшипниками, допускает ударные нагрузки. Введение полых цилиндров позволяет увеличить передаваемый момент при сохранении габаритов.

2.2.6 Электромагнит

Конструктивная схема

Рассматриваемый электромагнит относится к втяжным электромагнитам поступательного движения и может быть использован в электромеханизмах, в пневматических и гидравлических системах, где требуются малые перемещения и большие усилия, а также стабильность усилия по перемещению якоря.

На рисунке 2.21 показан электромагнит, который имеет магнитопровод 1 с двумя коническими наконечниками 2, имеющими кольцевые выступы 3, полые цилиндры 4, 5, якорь 6 с тягой 7, немагнитную втулку 8, обмотку 9, корпус 10 и возвратную пружину 11[36]. Полые цилиндры 4 представляют собой наборы колец из ферромагнитного и немагнитного материалов, они механически связаны с якорем 6 и движутся вместе с ним.



Рисунок 2.21 – Конструкция электромагнита с многослойным якорем

Полые цилиндры 5 содержат чередующиеся ферромагнитные и немагнитные кольца и соединены с магнитопроводом 1. Кольцевые выступы якоря 6 в два раза меньше высоты полых цилиндров 4,5. Осевая ширина всех ферромагнитных колец и выступов одинаковая. Ферромагнитные кольца показаны косой штриховкой, а немагнитные заштрихованы как диэлектрик.

Принцип действия

Электромагнит работает следующим образом [3]. При обесточенной обмотке возвратная пружина 11 перемещает якорь 6 вправо до упора. При этом имеется небольшое перекрытие выступов и ферромагнитных колец (на рисунке 2. якорь показан в среднем положении). При подаче напряжения на обмотку по ней течет электрический ток, возникает магнитный поток и появляется электромагнитная сила, действующая влево на якорь и на связанный с ним полый цилиндр 4. Эта сила действует через тягу 7 на исполнительный механизм.

Основные расчетные соотношения

По сравнению с классическим втяжным электромагнитом эффективность предлагаемой конструкции можно показать следующим образом. Сила, действующая на выступ якоря или кольцо полого цилиндра якоря, определяется формулами:

$$F_1 = \frac{U_m^2}{2} \frac{d\Lambda}{dx}; \qquad \Lambda = \mu_0 \frac{\pi d(b_0 + x)}{\delta}; \qquad U_m = H\delta = \frac{B\delta}{\mu_0}. \tag{2.38}$$

Здесь F_1 – сила; U_m – магнитное напряжение на зазоре; Λ – магнитная проводимость; x – перемещение якоря; μ_0 – магнитная постоянная; d – средний по зазору диаметр; b_0 – длина перекрытия при выключенной обмотке; δ – длина воздушного зазора; H – напряженность магнитного поля в зазоре; B – магнитная индукция в зазоре.

Дифференцируя проводимость Л, получаем:

$$F_1 = \frac{BH}{2} \delta \pi d; \qquad F = m \frac{B}{2} I w \pi d. \tag{2.39}$$

Здесь *m* – число выступов или ферромагнитных колец электромагнита (здесь *m* = 6); *Iw* – ампервитки (МДС) обмотки.

Из последней формулы следует, что с увеличением числа выступов электромагнита *m* сила *F* возрастает пропорционально при сохранении МДС обмотки.

выводы

1. Приведены основные положения построения конструкций электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами ротора и статора. Показаны основные расчетные соотношения, из которых следует возможность многократного увеличения усилия или крутящего момента в заданных габаритах при сохранении магнитодвижущей силы обмоток питания.

2. Приведены конструктивные схемы различных электрических машин и электромагнитных устройств с реализованным принципом многослойного магнитопроводов ротора и статора. Показаны основные расчетные соотношения для данных конструкций.

3. Показано, что в линейных вариантах электрических машин и электромагнитных устройств увеличение усилия или крутящего момента прямо пропорционально количеству рабочих зазоров.

4. Проведен расчет вариантов реализации цилиндрических машин (шагового реактивного двигателя и синхронного реактивного), учитывающего геометрию рабочей зоны и насыщение ферромагнитного материала. Данный расчет показывает, что при большом количестве рабочих зазоров (больше 5 – 7) происходит уменьшение крутящего момента вследствие явления насыщения. При оптимальном количестве рабочих зазоров (2 – 4) возможно увеличение крутящего момента в 2 – 3,5 раза.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ С МНОГОСЛОЙНЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ

В настоящей главе рассматривается методика расчета основных характеристик электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными магнитопроводами. Проводится сравнение электрической машины с одним рабочим зазором с машинами с несколькими рабочими зазорами.

3.1 Методика расчет шагового двигателя с многослойным ротором и статором

В качестве примера расчета электрической машины с многослойным ротором и статором выбираем шаговый двигатель. Методика расчета основана на методике расчета ВИД приведенной в [31]. Ниже изложенный подход может быть применен и к другим типам многослойных электрических машин и механизмов.

3.1.1 Исходные данные и задачи расчета

При проектировании электрических машин в качестве исходных данных используются следующие параметры:

– номинальная мощность P_H, кВт;

- номинальное напряжение питания $U_{\rm H}$, B;
- номинальная частота вращения $\varpi_{\rm H}$, pag/c;
- номинальный КПД $\eta_{\rm H}$.

Задачами расчета являются:

– определение главных размеров ЭМ (длины рабочего зазора δ , внутреннего диаметра статора D и расчетной длины его магнитопровода l_{δ});

– выбор электромагнитных нагрузок (линейной нагрузки A и максимальной индукции в воздушном зазоре при согласованном положении зубцов $B_{\delta \max}$);

– выбор числа фаз m и конфигурации магнитной системы (количества зубцов статора N_S и ротора N_R);

- расчет размеров зубцовой зоны статора и ротора;

– определение обмоточных данных фазной катушки.

3.1.2 Определение главных размеров ШД с МР

В традиционных типах электрических машин главные размеры и электромагнитные нагрузки связаны между собой уравнением универсальной машинной постоянной [27]:

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \omega_{\rm H}}{P'} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{\rm ol} B_\delta A},\tag{3.1}$$

где P' – расчетная мощность, ВА; α_{δ} – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; $k_{\rm B}$ – коэффициент формы кривой индукции; $k_{\rm o1}$ – обмоточный коэффициент для основной гармонической магнитного поля; B_{δ} – индукция в воздушном зазоре.

Вышеуказанное выражение получено в предположении о синусоидальном распределении поля в воздушном зазоре электрической машины, что не верно для случая рассматриваемых машин, следовательно, оно не может быть использовано при их проектировании.

В [51] приведено уравнение машинной постоянной для ИМ (индукторных машин), а рассматриваемые шаговые двигатели являются одним из вариантов реализации магнитных систем ИМ

$$C_{A} = \frac{D^{2} l_{\delta} \omega_{\rm H}}{P'} = \frac{1270}{k_{1}^{2} \eta_{\rm H} B_{\delta \rm max} A},$$
(3.2)

в котором $k_1 = 0.75...085 - коэффициент, зависящий от формы кривой тока.$

Выражение для машинной постоянной как для традиционных типов электрических машин, так и для ШД содержит четыре неизвестных и не дает возможности однозначно определить главные размеры и электромагнитные нагрузки. В этой ситуации при расчете ШД, некоторые переменные, входящие в уравнение (3.2), определяют исходя из опыта проектирования. При этом удобно пользоваться величиной удельного момента $M_{\rm yd}$, который представляет собой отношение электромагнитного момента $M_{\rm 3M}$ к объему ротора $V_{\rm R}$

$$M_{\rm yd} = \frac{M_{\rm 3M}}{V_{\rm R}} = \frac{M_{\rm 3M}}{\frac{\pi}{4} D_{\rm R}^2 I_{\rm \delta}}.$$
(3.3)

Электромагнитный момент ШД определяется его номинальными данными

$$M_{\rm 3M} = \frac{P_{\rm H}}{\Omega_{\rm H}}.$$
(3.4)

Удельный электромагнитный момент можно приблизительно определить по справочным данным (табл. 1) [31], полученным при проектировании ШД для различных областей проектирования. После изготовления и испытания серии ШД с многослойными магнитопроводами для ряда моментов может быть получена зависимость удельного момента от номинального электромагнитного момента для выбора начальных габаритных размеров.

Таблица 3.1. Значения удельного $M_{\rm yg}$ ШД для различных применений

Исполнение и область применения	Значение удельного мо-
	мента $M_{\rm yg}$, кНм/м ³
ШД малой мощности в закрытом исполнении	1,96 5,6
Общепромышленные ШД мощностью 1100 кВт	2,36 5,6
Аэрокосмические ШД	23,6 58,9
Мощные ШД с жидкостным охлаждением	78,5 196

Следует учесть, что в первом приближении данный показатель для многослойной конструкции будет в *n* раз больше, где n – количество рабочих зазоров. Выбрав значение удельного электромагнитного момента по табл. 3.1 легко определить объем ротора $V_{\rm R}$ и произведение $D_R^2 l_{\delta}$

$$D_{\rm R}^2 l_{\delta} = \frac{nM_{\rm 3M}}{V_{\rm R}} = \frac{nM_{\rm 3M}}{\frac{\pi}{4}M_{\rm yd}}.$$
(3.5)

После этого, задавшись значением отношения длины магнитопровода сердечника ротора l_{δ} к его диаметру $D_{\rm R}$, которое, как правило, лежит в диапазоне

$$l_{\delta} = (0, 5...2, 0) D_{\mathbf{R}} \,, \tag{3.6}$$

можно определить длину магнитопровода ротора и его внешний диаметр.

В ШД длина магнитопровода ротора, как правило, равна длине сердечника ротора. Следовательно, для определения главных размеров ШД остается найти внутренний диаметр сердечника статора. Очевидно, что для решения данной задачи следует выбрать значение воздушного зазора δ, что определит внутренний диаметр статора

$$D = D_{\rm R} + 2\delta. \tag{3.7}$$

В ШД средней мощности воздушные зазоры близки к зазорам асинхронных двигателей и составляют 0,3 ... 0,5 мм. Для ориентировочной оценки величины воздушного зазора ИМ можно использовать соотношение

$$\delta = \begin{cases} 5 \cdot 10^{-3} \cdot D_R, & \text{если } l_{\delta} / D_R \le 1 \\ (5 \div 10) \cdot 10^{-3} \cdot D_R, & \text{если } 1 < l_{\delta} / D_R \le 2 \end{cases}$$
(3.8)

Следует заметить, что при расчете многослойных электрических машин, зазор, рассчитанный по вышеуказанному выражению, является суммарным рабочим зазором в рабочей зоне с многослойными роторами и статорами.

3.1.3 Определение электромагнитных нагрузок

Установив главные размеры, можно найти произведение электромагнитных нагрузок $B_{\delta max}A$, определяющее азимутальное давление на единицу поверхности ротора.

В ШД электромагнитные нагрузки несколько выше, чем у асинхронных двигателей. Максимальная индукция в зазоре выше 1 Тл, а линейная нагрузка зависит от способа охлаждения и, как правило, на 10..20% превышает линейную нагрузку аналогичного по мощности и исполнению асинхронного двигателя. Данные значения могут быть использованы для контроля правильности выбора главных размеров ШД.

В случае, если определенное из (3.2) произведение электромагнитных нагрузок существенно отличается от результатов расчета по приведенным рекомендациям, то главные размеры следует скорректировать за счет задания другого удельного момента.

3.1.4 Выбор числа фаз и конфигурации магнитной системы

Выбор числа фаз и конфигурации магнитной системы представляет собой сложную задачу. При ее решении следует учесть особенности эксплуатации проектируемого двигателя.

В данной работе рассматриваются ШД с многослойной зоной рабочего зазора, которые могут быть реализованы с разным количеством фаз и различной конфигурацией магнитной системы (соотношении зубцов статора и ротора, классические варианты соотношений 6/4 или 12/8). Следует отметить, что по сравнению с ШД с одним рабочим зазором, увеличение количества рабочих зазоров приводить к пропорциональному увеличению количества ферромагнитных элементов ротора и статора, что в свою очередь обеспечивает более равномерное распределение усилий взаимодействия ротора и статора и соответственно приводит к меньшим уровням шумов и вибраций.

3.1.5 Выбор внешнего диаметра статора

Внешний диаметр статора (см. рисунок 3.1) зависит от внутреннего диаметра и определяется, как и в классическом варианте, соотношением

$$D_{\rm S} = (1,54...2,2)D. \tag{3.9}$$



Рисунок 3.1 – Конструктивные схемы шаговых электродвигателей: a) – классическая конструкция; б) – с многослойным ротором.

3.1.6 Проектирование зубцовой зоны статора и ротора

На рисунке 3.2 показана геометрия рабочей зоны многослойной магнитной системы для 3-х зазорного варианта.



Рисунок 3.2 – К расчету многослойной рабочей зоны

Расчет зубцовой зоны статора и ротора начинается с выбора количества рабочих зазоров *n*.

Исходные данные к расчету – выбранная конфигурация магнитной системы статора: количество фаз *m* и количество полюсов статора *N*_{PS}.

Угловые размеры зубцов и пазов ротора и статора берутся равными, в дальнейшем данные значения могут быть уточнены/изменены в ходе численного моделирования магнитного поля ШД.

Количество зубцов статора на полюсе берется равным количеству рабочих зазоров, следовательно, количество зубцов статора на одном рабочем зазоре равно

$$N_S = nN_{PS} = n2\,pm\,.\tag{3.10}$$

Количество зубцов ротора на одном рабочем зазоре будет равно

$$N_R = N_S + 2p. \tag{3.11}$$

Таким образом, угловые размеры зубцов и пазов ротора будут равны
$$\alpha_{ZR} = \alpha_{PR} = \frac{360^{\circ}}{2N_R}.$$
(3.12)

Угловые размеры зубцов и пазов статора равны угловым размерам зубцов ротора

$$\alpha_{ZS} = \alpha_{PS} = \alpha_{ZS} = \alpha_{PS}. \tag{3.13}$$

Для наиболее часто конфигураций ШД угловые размеры полюсов статора приведены в табл. 3.2 [11, 22, 55].

Таблица 3.2 – Значение угловых размеров полюсов статора для наиболее часто используемых ШД

Число фаз, т	Количество полюсов статора	Угловой размер полюса
		статора, β_{PS} °
3	6	30
3	12	15
4	8	24

По дуге β_{PS} определяется ширина полюса статора –

$$b_{PS} = \frac{D}{2} \sin(\beta_{PS}). \tag{3.14}$$

Высота полюсов статора определяется исходя из его внешнего и внутреннего диаметра, а также высоты ярма, как и в классическом варианте. Высота ярма статора выбирается в пределах $(0,5...0,7)b_{PS}$. Таким образом, диаметр ярма статора находится в пределах

$$D_{YS} = D_S - 2(0,5...0.7)b_{PS}.$$
(3.15)

Высота полюса статора определяется из соотношения

$$h_{PS} = \frac{D_{YS} - D}{2}.$$
 (3.16)

Для сохранения подобия картины магнитного поля в зоне взаимодействия зубцов и/или ферромагнитных элементов вводятся два коэффициента. Выразим длину рабочего зазора и его радиус используя коэффициент k_{δ}

$$k_{\delta} = \frac{R_i}{\delta_i}, k_{\delta} = \text{const},$$
 (3.17)

где R_i – радиус *i*-го рабочего зазора, δ_i – длина *i*-го рабочего зазора.

Высоту ферромагнитного элемента и длины рабочего зазора выразим через коэффициент k_h

$$k_h = \frac{h_i}{\delta_i}, \, k_h = \text{const},\tag{3.18}$$

где h_i – высота ферромагнитного элемента *i*-го рабочего зазора.

3.1.7 Расчет/проверка крутящего момента

Для случая шагового двигателя классической конструкции с одним рабочим зазором момент ротора равен:

$$M_{\kappa\pi} = p \frac{B_{\delta}^2 \delta R l_{\delta}}{\mu_0}.$$
(3.19)

Согласно выражению раздела 2.2.2 момент шагового электродвигателя с многослойным ротором и статором равен сумме моментов на различных рабочих зазорах

$$M_i = z_p p \frac{B_i^2 R_i \delta_i L}{\mu_0}, \ M = \sum_{i=1}^n M_i$$
 (3.20)

где n – число рабочих зазоров; B_i – магнитная индукция *i*-го рабочего зазора; R_i – радиус *i*-го рабочего зазора; δ_i – длина *i*-го рабочего зазора; z_p – количество зубцов на полюс.

Без учета насыщения выражение (3.20) примет вид

$$M_{i} = z_{p} p \frac{\left(B_{1} \frac{R_{1}}{R_{i}}\right) R_{i} \delta_{i} L}{\mu_{0}}, \ M = \sum_{i=1}^{n} M_{i},$$
(3.21)

где $B_i = B_1 \frac{R_1}{R_i}$ – магнитная индукция на *i*-ом зазоре без учета насыщения ферромагнетика.

3.1.8 Определение обмоточных данных

Геометрические размеры полюсов, ярма и катушек статора рассматриваемых конструкций многослойных ШД соответствуют классическим, соответственно расчет обмоточных данных подобных ШД ничем не отличается от стандартных расчетов [23-25, 27].

3.2 Пример расчета варианта с 1-им и 3-мя рабочими зазорами

Рассмотрим конструктивные схемы шаговых электродвигателей, приведенных на рисунке 3.1. Здесь представлены 4-х фазные шаговые двигатели с одной парой полюсов на фазу. На рисунке 3.1(а) показан классический вариант – 8 полюсов статора и 6 зубцов ротора. На рисунке 3.2(б) показан вариант с многослойным ротором и статором – каждый полюс статора имеет 3 маленьких зубца, а количество рабочих зазоров равно трем за счет введенных одного полого цилиндра ротора и одного полого цилиндра статора с чередующимися ферромагнитными элементами.

Для обеих конструкций примем равными основные геометрические размеры: l_{δ} – активная длина ротора; D – диаметр расточки статора; D_S – внешний диаметр статора; D_{YS} – диаметр ярма статора; h_{PS} – высота полюса статора; b_{PS} – ширина полюса статора; d_0 – диаметр вала.

Обмоточные данные обеих конструкций принимаются одинаковыми. Высота зубца ротора h_{ZR} для классической конструкции соответствует высоте многослойной рабочей зоны на рисунке 3.1(б).

Исходные данные к расчету

 $P_n = 4000$ Вт – номинальная мощность. $U_n = 400$ В – номинальное напряжение. $i_{red} = 3$ – коэффициент редукции ротора в классическом варианте. $n_n = \frac{3000}{i_{red}} = 1000$ об/мин – номинальная скорость вращения.

Расчет конструкции с 1-м рабочим зазором

Расчет основных параметров

Выбираем удельное значение момента для общепромышленного исполнения ШД согласно табл. 3.1.

$$M_{yg} = 5.6 \frac{\kappa H \cdot M}{M^3}.$$
 (3.22)

Выбрав значение удельного электромагнитного момента определяем произведение $D_R^2 l_\delta$.

$$D_R^2 l_\delta = \frac{M_{\rm 3M}}{M_{\rm yg} \frac{\pi}{4}} \tag{3.23}$$

Берем длину ротора и его диаметр одинаковыми.

$$D_R = l_{\delta}. \tag{3.24}$$

Тогда диаметр ротора будет равен

$$D_R = \sqrt[3]{\frac{M_{\rm 3M}}{M_{\rm y,I}\frac{\pi}{4}}}.$$
(3.25)

Момент электромагнитный для классического варианта с 1-им рабочим зазором равен

$$M_{\Im M1} = \frac{P_{\rm n}}{2\pi f_n} = 38,19 \,\,{\rm H} \cdot {\rm M}. \tag{3.26}$$

Диаметр ротора будет равен

$$D_R = \frac{M_{3M1}}{M_{yA} \frac{\pi}{4}} = 205,6 \text{ MM.}$$
(3.27)

Диаметр ротора берем равным

$$D_R = 200$$
 MM. (3.28)

Длина ротора соответственно

$$l_{\delta} = D_R = 200$$
 MM. (3.29)

Длина рабочего зазора

$$\delta_0 = 0,005 D_R = 1 \text{ MM.} \tag{3.30}$$

В случае многослойного варианта данный зазор будет делиться на несколько рабочих зазоров.

Диаметр расточки статора равен

$$D = D_R + 2\delta = 202 \text{ MM.}$$
(3.30)

Наружный диаметр статора берется равным (1,54..2,2)D

$$D_S = 1,73 \cdot D = 349,5 \text{ MM.} \tag{3.31}$$

Округляем до $D_S = 350$ мм.

Выбор количества фаз и конфигурации магнитной системы

На рисунке 3.3 выбрана конфигурация 4-х фазного ШД с 1-ой парой полюсов на фазу. Количество зубцов ротора – 6.



Рисунок 3.3 – ШД с 1-им рабочим зазором и конфигурацией 8/6

Остальные геометрические размеры магнитной системы рассчитываются стандартным способом.

Проверим крутящий момент полученной конструкции, при этом индукцию в рабочем зазоре возьмем равной $B_{\delta} = 1,4$ Тл.

$$M_{\rm KJI} = p \frac{B_{\delta}^2 \delta R l_{\delta}}{\mu_0} = 31,50 \,\,\mathrm{H} \cdot \mathrm{M}. \tag{3.31}$$

С учетом требуемого значения электромагнитного момента

$$M_{\rm 2M1} = 38,19 \,\rm H \cdot M \tag{3.32}$$

пересчитаем активную длину ротора

$$l_{\delta_{\rm H}} = l_{\delta} \frac{M_{\rm 3M1}}{M_{\rm KI}} = 242,5 \,\rm MM.$$
(3.33)

Далее полученное значение длины ротора будем обозначать

$$l_{\delta} = 242,5 \text{ MM.}$$
 (3.34)

Расчет обмоточных данных

Расчет обмоточных данных сводится к стандартному расчету для ШД и в данном разделе не приводится, но принимается одинаковым для конструкций с 1-им и с 3-мя рабочими зазорами.

Расчет конструкции с 3-мя рабочими зазорами

Расчет основных параметров

- . - -

Основные геометрические размеры берутся такие же, как и у конструкции с 1-им рабочим зазором.

Расчет геометрических размеров рабочей зоны статора и ротора

Количество зубцов статора на полюсе берется равным количеству рабочих зазоров, следовательно, количество зубцов статора на одном рабочем зазоре равно

$$N_{S} = nN_{PS} = 24$$
, где $N_{PS} = 8$ – количество полюсов статора. (3.34)

Количество зубцов ротора на одном рабочем зазоре будет равно

$$N_R = N_S + 2p = 26. (3.35)$$

Таким образом, угловые размеры зубцов и пазов ротора будут равны

$$\alpha_{ZR} = \alpha_{PR} = \frac{360^{\circ}}{2N_R} = 6,923^{\circ}.$$
(3.36)

Угловые размеры зубцов и пазов статора равны угловым размерам зубцов ротора

$$\alpha_{ZS} = \alpha_{PS} = \alpha_{ZS} = \alpha_{PS}. \tag{3.37}$$

Выразим длину рабочего зазора и его радиус, используя коэффициент k_{δ}

$$k_{\delta} = \frac{R_i}{\delta_i}, k_{\delta} = \text{const},$$
 (3.38)

где R_i – радиус *i*-го рабочего зазора, δ_i – длина *i*-го рабочего зазора.

Высоту ферромагнитного элемента и длины рабочего зазора выразим через коэффициент k_h

$$k_h = \frac{h_i}{\delta_i}, \, k_h = \text{const},\tag{3.39}$$

где h_i – высота ферромагнитного элемента *i*-го рабочего зазора.

Зададимся значение коэффициента $k_h = 30$.

Зададимся начальным значением коэффициента k_{δ} , как

$$k_{\delta 0} = \frac{R_1}{\frac{\delta_0}{n}} = 303, \tag{3.40}$$

где δ_0 – суммарный зазор равный 1 мм.

Исходными данными для расчета длин рабочих зазоров, высоты ферромагнитных элементов и радиусов рабочих зазоров являются

$$R_1 = 101 \text{ MM}, \delta_0 = 1 \text{ MM}, k_h = 30, k_{\delta 0} = 303.$$
 (3.41)

Согласно рисунку 3.2 расчет выше указанных геометрических размеров сводится к нижеследующим действиям.

1. Определяем геометрические размеры наружного рабочего зазора.

$$\delta_1 = \frac{R_1}{k_\delta}, \ h_1 = k_h \delta_1.$$
 (3.42)

2. Геометрические размеры второго рабочего зазора будут равны

$$R_2 = R_1 - \delta_1 - h_1, \ \delta_2 = \frac{R_2}{k_\delta}, \ h_2 = k_h \delta_2.$$
(3.43)

3. И соответственно размеры третьего зазора

$$R_3 = R_2 - \delta_2 - h_2, \ \delta_3 = \frac{R_3}{k_\delta}, \ h_3 = h_{ZR} = 0.6k_h\delta_3.$$
(3.44)

В последнем случае высота зубца ротора берется равной 0,6 от высоты аналогичного ферромагнитного элемента.

В данном расчете вместо коэффициента k_{δ} используется предварительно рассчитанный коэффициент $k_{\delta 0}$.

4. Далее проводим проверку полученных рабочих зазоров

$$\delta_S = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad \varepsilon_t = \frac{\delta_0 - \delta_S}{\delta_0}. \tag{3.45}$$

5. Если полученное значение текущего ε_t превышает значение заданного ε , то расчет повторяется, но с измененным коэффициентом k_{δ}

$$k_{\delta} = k_{\delta} - k_{\delta} \varepsilon_t.$$

Реализация данного алгоритма для расчета геометрии зубцовой зоны 3-х зазорного варианта в среде Mathcad 14 показана на рисунке 3.4.

В данном случае параметры расчета следующие

 $Eps = 0,001, R_1 = 101 \text{ MM}, n = 3, del_0 = 1 \text{ MM}.$

Результаты расчета показывают, что начальное значение коэффициента k_{δ} с 303 изменилось практически до 270, при этом проверка суммарного зазора показывает соответствие заданной точности Eps.

Высота ферромагнитных элементов соответственно равна для первого рабочего зазора 11,2 мм, для второго 9,94, и высота зубцов ротора – 5,28 мм.

$$\begin{split} \Prcl\left(n,R_{1},Eps,k_{h}\right) \coloneqq & \left| \begin{array}{l} k_{del} \leftarrow \frac{R_{1}}{de_{b}} \\ delg \leftarrow 0.mm \\ Eps_{t} \leftarrow \frac{del_{0} - delg}{del_{0}} \\ while Eps_{t} \geq Eps \\ R_{S_{1}} \leftarrow R_{1} \\ del_{1} \leftarrow \frac{R_{S_{1}}}{k_{del}} \\ h_{1} \leftarrow k_{h}.del_{1} \\ for \ i \in 2..n \\ R_{S_{1}} \leftarrow R_{1} \\ del_{i} \leftarrow \frac{R_{S_{1}}}{k_{del}} \\ h_{i} \leftarrow k_{h}.del_{i} \\ delg \leftarrow \sum_{j=1}^{n} del_{j} \\ Eps_{t} \leftarrow \frac{del_{0} - del_{S}}{del_{0}} \\ k_{del} \leftarrow k_{d}.del_{i} \\ delg \leftarrow k_{del} - k_{de}.del_{j} \\ k_{del} \leftarrow k_{de}.del_{j} \\ k_{del} \leftarrow k_{de}.del_{j} \\ escale{1} \\ escal$$

-82-

в ПО Mathcad 14

По полученным геометрическим размерам была простроена конструктивная схема ШД с 3-мя рабочими зазорами (см. рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – ШД с 3-мя рабочими зазорами

Расчет крутящего момента без учета насыщения ферромагнитного материал

Момент ротора для 3-х зазорного шагового двигателя будет равен

$$M_{i} = z_{p} p \frac{\left(B_{1} \frac{R_{1}}{R_{i}}\right) R_{i} \delta_{i} l_{\delta}}{\mu_{0}}, \quad M = \sum_{i=1}^{n} M_{i}, \quad (3.46)$$

где $B_i = B_1 \frac{R_1}{R_i}$ – магнитная индукция на *i*-ом зазоре без учета насыщения ферро-

магнетика.

Магнитная индукция на первом рабочем зазоре равна $B_1 = 1,4$ Тл.

Тогда суммарный момент будет равен

 $M_3 = 128,83 \text{ H} \cdot \text{м}.$

Распределение магнитной индукции вдоль рабочих зазоров

$$B = \begin{pmatrix} 1,4\\1,58\\1,78 \end{pmatrix} \mathrm{T}\pi.$$

Соотношение момента 3-х зазорного варианта без насыщения и классического равно

$$k_{m3} = \frac{M_3}{M_{\rm KJI}} = \frac{128,83}{38,19} = 3,37.$$

Таким образом, в 3-х зазорном варианте без учета насыщения крутящий момент будет 3,37 раз больше классического варианта с одним рабочим зазором.

Расчет крутящего момента с учетом насыщения ферромагнитного материал

Для учета насыщения будем считать, что магнитная индукция на внутреннем рабочем зазоре ограничивается значением 1,6 Тл. Тогда распределение магнитной индукции по рабочим зазорам можно рассчитать следующим образом

$$B_i = kR_i + c$$
, при этом
 $B_1 = kR_1 + c$,
 $B_3 = kR_3 + c$, тогда
 $k = \frac{B_1 - B_3}{R_1 - R_n}, \ c = B_3 - R_n k.$

Магнитная индукция на зазорах с учетом насыщения будет равна

$$B^{\mathrm{Hac}} = \begin{pmatrix} 1,4\\1,5061\\1,6 \end{pmatrix}$$
Тл.

Крутящий момент ротора будет равен сумме моментов на всех рабочих зазорах

$$M_i = z_p p \frac{B_i^2 R_i \delta_i l_\delta}{\mu_0},$$

 $M_3^{\text{Hac}} = \sum_{i=1}^n M_i = 116,27 \text{ H} \cdot \text{м}.$

Соотношение момента 3-х зазорного варианта с учетом насыщения и классического равно

$$k_{m3}^{\text{Hac}} = \frac{M_3^{\text{Hac}}}{M_{\text{KII}}} = \frac{116,27}{38,19} = 3,04.$$

Таким образом, в 3-х зазорном варианте с учетом насыщения крутящий момент будет 3,04 раз больше классического варианта с одним рабочим зазором.

3.3 Сравнительный расчет многослойных ШД

Выше рассмотренный расчет был проведен для 2-х, 4-х и 5-ти зазорных вариантов ШД. При этом основные геометрические размеры, как и в разделе 3.2 были одинаковы для всех случаев. Изменения касались лишь рабочей многозазорной зоны статора и ротора. Пример расчета приведен в Приложении А.

Расчеты были проведены как для случая без учета насыщения, так и с учетом насыщения.

Результаты расчет показаны на рисунке 3.7.



Рисунок 3.6 – Конструктивные схемы ШД: а) – с 1-им зазором; б) – с 2-мя зазорами; в) – с 3-мя зазорами; г) – с 4-мя зазорами; д) – с 5-ю зазорами



Рисунок 3.7 – Зависимость относительного крутящего момента от количества рабочих зазоров

Здесь:

$$k_{mi_{i}} = \frac{M_{i}}{M_{KI}}$$
 – отношение момента ротора ШД без учета насыщения к момен-

ту ШД с 1-им рабочим зазором;

$$k_{m_{-}n_{i}} = \frac{M_{i}^{\text{Hac}}}{M_{\text{KJ}}}$$
 – отношение момента ротора ШД с учетом насыщения к мо-

менту ШД с 1-им рабочим зазором.

Из полученных графиков видно, что даже с учетом насыщения ферромагнитного материала увеличение крутящего момента практически прямо пропорционально увеличению количества рабочих зазоров. При этом геометрия рабочей зоны для каждого варианта рассчитана исходя из сохранения подобия картины магнитного поля в зоне взаимодействия зубцов(ферромагнитных элементов) ротора и статора между собой. 3.4 Численный расчет магнитного поля ШД с многослойной рабочей зоной

Рассчитанные в разделе 3.3 конструктивные схемы ШД с многослойной рабочей зоной были использованы в качестве моделей для численного расчета крутящего момента методом конечных элементов в ПО AnsoftMaxwell 14.0[1].

Исходные данные к расчету

Ферромагнитный материал – Ст 2212 (тонколистовая холоднокатаная изотропная сталь)[47, 56].





Ампер-витки катушки фазы А рассчитываем по соотношению

$$Iw = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta_0 = \frac{1.4 \text{ T}\pi}{\mu_0} 1 \text{ MM} = 1114,1\text{A}.$$

Ампер-витки берем равными 1150 А. Активная длина машины – $l_{\delta} = 242,5$ мм. Количество точек расчета каждой кривой – не менее 20.

Настройка метода расчета

Максимальное количество итераций – 10.

Точность pacчета (Percent Error) – 1%.

Процент увеличения элементов сетки каждой итерации – 30%.

Задача расчета

Расчет угловой характеристики $M(\theta)$.

Модель расчета

В качестве примера модели расчета показана на рисунке 3.9 модель ШД с 3мя рабочими зазорами. Здесь: светло серым показан статор, темно серым – ротор, оранжевым – катушки фазы А. Катушки фазы А включены согласованно. Ротор поворачивается от согласованного положения ротора под полюсом фазы А в рассогласованное положение зубцов ротора и статора. Для каждой задачи расчета количество угловых положений не менее 20-ти.



Рисунок 3.9 – Модель расчета ШД с 3-мя рабочими зазорами

-90-



Рисунок 3.10 – Картина магнитного поля для ШД с 3-мя рабочими зазорами при $\theta = 0^{\circ}$

На рисунке 3.10 показана картина магнитного поля ШД с 3-мя рабочими зазорами при согласованном положении зубцов и ротора и статора под полюсом статора фазы А. Видно, что индукция в зазорах и зубцах (ферромагнитных элементах), находящихся под полюсом статора фазы А находится в районе 1,4 Тл, т.е. расчетного значения индукции.

На рисунке 3.11 показана картина магнитного поля при сдвиге ротора на 3,3°.



Рисунок 3.11 – Картина магнитного поля для ШД с 3-мя рабочими зазорами при θ = 3,3° (Alfa – переменная моделирования)

Результаты расчета для всех моделей, приведенных на рисунке 3.6, т.е. для ШД с рабочими зазорами от 1-го до 5-ти, приведены на рисунке 3.12. Вектор Ex1 соответствует значениям кривой момента для ШД с 1-им рабочим зазором, Ex2 – для 2-х зазорного ШД и т.д. На графике видно, что с увеличением количества рабочих зазоров, увеличивается максимальное значение крутящего момента ротора.

-91-



Рисунок 3.12 – Зависимость $M(\theta)$ для ШД с различным количеством рабочих зазоров (*n*)

Максимальные значения крутящих моментов для выше приведенных кривых равны

$$M_{max} = \begin{pmatrix} 37,17\\ 60,92\\ 86,85\\ 112,30\\ 140,50 \end{pmatrix} \text{H} \cdot \text{M}.$$

При этом расчетное значение крутящего момента для классического варианта с одним рабочим зазором (см. раздел 3.2) и его отношение к моменту, полученному моделированием, равны

$$M_{\text{эм1}} = 38,19 \,\text{H} \cdot \text{м}.$$

 $\frac{M_1^{\text{мод}}}{M_{\text{эм1}}} = \frac{37,17}{38,19} = 0,973.$

T.e. выбранная система моделирования с большой точностью обеспечивает расчет магнитных полей и полученные значения с большой точностью соотносятся с аналитическими расчетами.

На рисунке 3.13 показаны результаты расчета аналитического расчета и численного моделирования ШД с различным количеством рабочих зазоров.



Рисунок 3.13 – Зависимость относительного крутящего момента от количества рабочих зазоров

Здесь:

$$k_{mi_i} = \frac{M_i}{M_{_{\rm KJ}}}$$
 – отношение момента ротора ШД без учета насыщения к момен-

ту ШД с 1-им рабочим зазором (аналитический расчет раздела 3.2);

 $k_{m_{-}n_{i}} = \frac{M_{i}^{\text{Hac}}}{M_{\text{KJ}}}$ – отношение момента ротора ШД с учетом насыщения к мо-

менту ШД с 1-им рабочим зазором (аналитический расчет раздела 3.2);

 $k_{m_{-}r_{i}} = \frac{M_{i}^{\text{чис}}}{M_{1}^{\text{чис}}}$ – отношение момента ротора ШД к моменту ШД с 1-им ра-

бочим зазором (численный расчет раздела 3.4);

 $k_{m_apr_i} = 0.75k_{m_n_i}, i = 2..n$ – коррекция результатов аналитического расчета к результатам моделирования.

Из последнего выражения видно, что параметры многослойных ШД могут быть рассчитаны с помощью методики представленной в данной главе и аппроксимированы с большой точностью (как показывает численный метод расчета).

выводы

1. Разработана методика расчета ШД цилиндрического типа с несколькими рабочими зазорами на базе метода расчета классического ШД с 1-им рабочим зазором.

2. Показан и реализован алгоритм построения многослойной рабочей зоны статора и ротора ШД. В данном алгоритме показан способ сохранения подобия картины магнитного поля в зонах взаимодействия зубцов (ферромагнитных элементов) ротора и статора.

3. Проведен сравнительный расчет по выше разработанной методике расчета ШД с различным количеством рабочих зазоров (от 1-го до 5-ти) для ШД одного типоразмера и одинаковых обмоточных данных. Данный расчет показал прямо пропорциональное увеличение крутящего момента от количества рабочих зазоров, как без учета насыщения, так и с учетом насыщения ферромагнитного материала.

4. Проведен численный проверочный расчет методом конечных элементов ШД с рабочими зазорами от 1-го до 5-ти. Данный расчет с учетом коэффициента аппроксимации показал высокую точность и повторяемость разработанной методики расчета ШД с несколькими рабочими зазорами.

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ С МНОГОСЛОЙНЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ РОТОРА И СТАТОРА

4.1 Исследование влияния ширины ферромагнитных элементов на усилие электромагнита

В данном разделе исследуется влияние ширины зубцов и ферромагнитных элементов статора и лайнера на усилие электромагнита. Моделирование проводилось в среде расчета магнитных полей методом конечных элементов AnsoftMaxwell 14.0 [1, 10].

Целью исследования является нахождение ширины зубцов (ферромагнитных элементов) статора и лайнера, обеспечивающих максимальное значение усилия электромагнита. Для достижения поставленной цели были получены зависимости усилия электромагнита от перемещения лайнера при различной ширине зубцов и ферромагнитных элементов статора и лайнера.

Модель расчета

На рисунке 4.1 показана начальная модель расчета.



Рисунок 4.1 – Модель расчета

На рисунке 4.1(1) показано начальное положение лайнера электромагнита, на рисунке 4.1(2) – конечное положение лайнера (смещение лайнера равно 8 мм). Начальная ширина зубцов статора и лайнера – 8 мм. Остальные геометрические размеры показаны на рисунке 4.1 слева. Варианты изменения ширины зубцов по-казаны на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Изменение ширины зубцов статора и лайнер

Исходные данные к расчету

Ферромагнитный материал – Ст 2212 (тонколистовая холоднокатаная изотропная сталь).

Ампер-витки катушки рассчитываем из соотношения

$$Iw = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta_0 = \frac{1.4 \text{ T}\pi}{\mu_0} 2 \text{ MM} = 2228 \text{ A}, \ (\delta_0 = 4\delta = 4 \cdot 0.5 \text{ MM}).$$

Ампер-витки берем равными 2500 А.

Активная длина электромагнита – $l_{\delta} = 30$ мм.

Количество точек расчета каждой кривой – не менее 20.

Настройка метода расчета

Максимальное количество итераций – 15.

Точность расчета (Percent Error) -0.2%.

Процент увеличения элементов сетки каждой итерации – 30%.

Задача расчета

Расчет характеристики F(x).

На рисунке 4.2 показаны картины магнитного поля электромагнита с зубцами шириной 8 мм при начальном положении лайнера и при смещении на 4 мм. Из картины поля начального положения видно, что индукция в зубцах и зазоре чуть выше 1,4 – 1,5 Тл, что соответствует действительности, т.к. выбранные ампервитки катушке несколько больше расчетного значения при индукции в 1,4 Тл.

-99-



Рисунок 4.3 – Картины магнитных полей электромагнита №1 при начальном положении (сверху) и при смещении лайнера на 4 мм (снизу)

Результаты моделирования в виде кривых усилий от перемещения лайнера при разной ширине зубца статора и лайнера показаны на рисунке 4.4.



Перемещение лайнера – х, мм

Рисунок 4.4 – Результаты моделирования F(x)

Максимальные значения усилий для вышеприведенных кривых равны

$$F_{max} = \begin{pmatrix} 172,98\\179,0\\182,89\\184,79\\184,92\\183,13 \end{pmatrix} \text{H.}$$

Максимальное значение усилия соответствует варианту № 5 и равно

 $F_{5\max} = 184,92$ H.

Увеличение усилия по сравнению с начальным вариантом в процентном соотношении k_F и коэффициент ширины зубца k_z к ширине зубцового деления ($\tau_z = 8$ мм) равны

Таким образом, максимальное увеличение усилия соответствует 5-ому варианту (ширина зубца – 4,2 мм), однако, при этом перемещение лайнера возможно лишь на 4,2 – 4,3 мм.

4.2 Исследование влияния длины рабочего зазора на усилие электромагнита

В данном разделе исследуется влияние длины рабочего зазора на усилие электромагнита. Моделирование проводилось в среде расчета методом конечных элементов AnsoftMaxwell 14.0.

Целью исследования является нахождение длины рабочего зазора, обеспечивающего максимальное значение усилия электромагнита. Для достижения поставленной цели были получены зависимости усилия электромагнита от перемещения лайнера при различной длине рабочего зазора и сохранении остальных размеров.

Модель расчета

На рисунке 4.4 показана модель расчета № 1 с длиной рабочего зазора 1 мм.



Рисунок 4.4 – Модель расчета №1

На рисунке 4.4(1) показано начальное положение лайнера электромагнита, на рисунке 4.4(2) – конечное положение лайнера (смещение лайнера равно 16 мм). Начальная длина рабочего зазора – 1 мм. Остальные размеры показаны на рисунке 4.4(1). Варианты изменения длины рабочего зазора показаны на рисунке 4.5.

Исходные данные к расчету

Ферромагнитный материал – Ст 3.

Ампер-витки катушки рассчитываем из соотношения

$$Iw = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta_0 = \frac{1.1 \text{ T}\pi}{\mu_0} 2 \text{ MM} = 1751 \text{ A}, \ (\delta_0 = 2\delta = 2 \cdot 1 \text{ MM}).$$

Ампер-витки берем равными 1800 А.

Активная длина электромагнита – $l_{\delta} = 30$ мм.

Количество точек расчета каждой кривой – не менее 20.

-102-



Рисунок 4.5 – Модели расчета с различной длиной рабочего зазора Настройка метода расчета

Максимальное количество итераций – 15.

Точность расчета (Percent Error) – 0,2%.

Процент увеличения элементов сетки каждой итерации – 30%.

Задача расчета

Расчет характеристики F(x).

На рисунке 4.6 показаны картины магнитных полей электромагнита со смещенными лайнерами с рабочим зазором 1 мм (4.6(1)) и с рабочим зазором 0,25 мм (4.6(2)). Из картины поля 4.6(1) видно, что индукция в зубцах и зазоре находится в районе 1,0 – 1,2 Тл, что соответствует выбранному значению ампер-витков катушки.



Рисунок 4.6 – Картины магнитных полей электромагнита:

1) $\delta = 1 \text{ mm}$; 2) $\delta = 0,25 \text{ mm}$

Из картины поля 4.6(2) видно, что индукция в углах зубцах и зазоре находится в значениях более 2,0 Тл, что соответствует переходу зубца в насыщенное состояние и говорит о не рациональном использовании ферромагнитного материала зубцов.

Результаты моделирования в виде кривых усилий от перемещения лайнера при разной длине рабочего зазора показаны на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Результаты моделирования *F*(*x*) при различных длинах рабочих зазорах

Максимальные значения усилий для вышеприведенных кривых равны

$$F_{max} = \begin{pmatrix} 39,718 \\ 79,43 \\ 138,98 \end{pmatrix} \text{H}.$$

Максимальное значение усилия соответствует варианту №3 и равно

 $F_{3\max} = 138,98$ H.

Коэффициент $k_{F\delta}$ отношения максимального усилия кривых эксперимента к максимальному значению первого эксперимента и коэффициент k_{δ} отношения высоты зубца к длине рабочего зазора ($h_z = 8$ мм) равны

$$k_{F\delta} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3,49 \end{pmatrix}, \ k_{\delta} = \begin{pmatrix} 8 \\ 16 \\ 32 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, максимальное увеличение усилия соответствует 3-ему варианту (длина рабочего зазора – 0,25 мм), однако, при этом около 1/3 поверхности зубцов находится в насыщенном состоянии (магнитная индукция превышает значение 2 Тл).

Стоит заметить, что в первом случае кривая усилия имеет горизонтальный характер практически вдоль всего перемещения лайнера, а в последнем случае усилие электромагнита увеличивается с перемещением лайнера линейно и максимальное усилие достигается в районе x = 15 мм.

4.3 Лабораторный эксперимент. Исследование электромагнитов с многослойными магнитопроводами статора и лайнера

Целью эксперимента является подтверждение увеличения усилия электромагнита при увеличении количества рабочих зазоров при сохранении подобия картины магнитного поля в зоне взаимодействия зубцов статора и лайнера. Для достижения поставленной цели были получены зависимости усилия электромагнита от перемещения лайнера при различных количествах рабочих зазоров.

Для подтверждения предлагаемой идеи был спроектирован и изготовлен электромагнит, имеющий соответствующие сменные полюса и лайнеры. Конструкции электромагнита с разными полюсами приведены на рис. 4.8(а) и 4.8(б). Слева показана классическая конструкция, имеющая два больших зубца на полюсах статора и лайнер, состоящий из двух ферромагнитных элементов, разделенных немагнитным материалом (на рисунке показан темным цветом). Справа показана конструкция электромагнита, имеющего двухслойный якорь: высота зубцов, их ширина, зубцовое деление и зазор уменьшены в два раза.



Рисунок 4.8 – Модели электромагнитов: а) классическая, б) многослойная

Параметры эксперимента

Напряжение питания катушки – 24 В.

Ампер-витки обмотки – 1800 А.

Материал магнитопровода – Ст3.

Нагрузочное (измерительное) устройство – динамометр ДПУ-0.2-2 (класс точности 2).

На рисунке 4.9 показаны фотографии изготовленных электромагнитов. Классический вариант с 2-мя рабочими зазорами длиной в 1 мм показан на рисунке 4.9(1) (см. Приложение Б). Вариант с многослойным лайнером и с 4-мя рабочими зазорами длиной 0,25 мм показан на рисунке 4.9(2) (см. Приложение В). Изменение конструкции рабочей зоны достигается за счет съемных полюсов. Вертикальное передвижения лайнера ограничивается капролоновыми пластинами, они же служат поверхностью скольжения.



Рисунок 4.9 – Экспериментальный электромагнит: 1) классическая конструкция; 2) многослойная конструкция

Схема лабораторной установки показана на рисунке 4.10 [4, 20]. Электромагнит и штатив устанавливаются на неподвижное основание. Штатив имеет механизм малых перемещений, выполненный в виде винта, установленного в опоры вращения, обеспечивающих вращение вокруг своей оси винта и ограничение его осевого перемещения. Винт имеет головку для его вращения. На винт накручена гайка, перемещающаяся вдоль направляющих в осевом направлении. Между лайнером и гайкой установлен динамометр. Вращением головки винта производится малое перемещение гайки и соответственно лайнера через динамометр, фиксирующий усилие втяжное электромагнита.
-109-



Рисунок 4.10 – Схема лабораторной установки

Результаты измерения усилия от перемещения якоря, при одинаковых значениях напряжения и тока обмотки, показаны на рисунке 4.11.

Графики на рисунке 4.11 (сплошные кривые) показывают, что усилие, развиваемое электромагнитом с двухслойным лайнером, больше усилия, развиваемого электромагнитом классического исполнения, приблизительно в два раза, при этом перемещение якоря уменьшается в два раза (правило рычага). Если первую сплошную кривую увеличить по оси ординат в два раза, а вторую сплошную по оси абсцисс, то мы увидим, что они практически совпадают (штриховая и штрихпунктирная кривые), что говорит о подобии картины магнитного поля в первом и втором случаях. Таким образом, в том же объеме и при тех же параметрах обмотки, благодаря многослойной конструкции лайнера, был получен электромагнит с увеличенным в два раза усилием, по сравнению с классической конструкцией с однослойным лайнером.



Рисунок 4.11 – Зависимость усилия от перемещения якоря

4.4 Сравнение результатов численного моделирования и лабораторных данных

В данном разделе приводятся результаты численного моделирования эксперимента, приведенного в разделе № 4.3, и сравнение с результатами численного эксперимента раздела № 4.3. Моделирование проводилось в среде расчета методом конечных элементов AnsoftMaxwell 14.0.

Целью исследования является подтверждение вышеуказанных соотношений о возможности увеличения усилия при увеличении количества рабочих зазоров и сравнение результатов численного и лабораторного экспериментов. Для достижения поставленной цели были получены зависимости усилия электромагнита от перемещения лайнера при различных количествах рабочих зазоров.

Модель расчета

На рисунке 4.12 показана модель расчета № 1 с длиной рабочего зазора 1 мм.



Рисунок 4.12 – Модель расчета №1

На рисунке 4.12(1) показано начальное положение лайнера электромагнита, на рисунке 4.12(2) – конечное положение лайнера (смещение лайнера равно 16 мм). Начальная длина рабочего зазора – 1 мм. Остальные размеры показаны на рисунке 4.12(1). Варианты изменения количества рабочих зазоров показаны на рисунке 4.13.

Исходные данные к расчету

Ферромагнитный материал – Ст 3.

Ампер-витки катушки рассчитываем по соотношению

$$Iw = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta_0 = \frac{1.1}{\mu_0} 2 = 1751 \text{ Å}, \ (\delta_0 = 2\delta = 2 \cdot 1 \text{ mm}).$$

Ампер-витки берем равными 1800 А.

Активная длина электромагнита – $l_{\delta} = 30$ мм.

Количество точек расчета каждой кривой – не менее 20.

-111-



Рисунок 4.13 – Модели расчета с различным количеством рабочих зазоров Настройка метода расчета

Максимальное количество итераций – 15.

Точность расчета (Percent Error) – 0,2%.

Процент увеличения элементов сетки каждой итерации – 30%.

Задача расчета

Расчет характеристики F(x).





Рисунок 4.14 – Картины магнитных полей электромагнита: 1) $\delta = 0,5$ мм ; 2) $\delta = 0,25$ мм

На рисунке 4.14 показаны картины магнитных полей электромагнита со смещенными лайнерами с рабочими зазорами 0,5 мм (4.14(1)) и с рабочими зазорами 0,25 мм (4.14(2)). Из картины поля 4.14(1) видно, что индукция в зубцах и зазоре находится в районе 1,0 – 1,2 Тл, что соответствует выбранному значению ампер-витков катушки.

На рисунке 4.14(2) ферромагнитный материал недоиспользуется по магнитной индукции. В связи с этим ампер-витки катушки были увеличены с 1800 А до 3000 А (см. рис. 4.15). Здесь видно, что магнитная индукция в рабочем зазоре равна 1,6-1,8 Тл, что является допустимым значением.



Рисунок 4.15 – Картина магнитного поля электромагнита: $\delta = 0.25$ мм; Iw = 3000 А



бочих зазоров (δ) и при различных их количествах (*n*); б) сравнение усилий численного и лабораторного экспериментов

На рисунке 4.16(а) показаны кривые моделирования электромагнита при различных количествах рабочих зазоров. Из графиков усилий видно, что усилие увеличивается прямо пропорционально увеличению количества рабочих зазоров, а перемещение уменьшается, что соответствует правилу рычага.

На рисунке 4.16(б) показаны кривые 1 и 2 усилий электромагнита лабораторного (рисунок 4.9) и результаты численного моделирования. Полученные результаты показывают хорошую сходимость экспериментальных данных и данных численного моделирования. Погрешность моделирования обусловлена наличием трения в лабораторном макете электромагнита.

Результаты моделирования в виде кривых усилий от перемещения лайнера при разной длине рабочего зазора показаны на рисунке 4.17.



Перемещение лайнера – х, мм

Рисунок 4.17 – Результаты моделирования F(x) при различных длинах рабочих зазоров (δ) и при различных их количествах (n)

Максимальное значение усилия для начального варианта равно

 $F_{1\text{max}} = 39,718$ H.

Максимальные значения усилий для вышеприведенных кривых при *Iw* = 1800 А равны

$$F_{\max}^{KJ} = \begin{pmatrix} 79,43\\138,98 \end{pmatrix} H, F_{\max}^{n} = \begin{pmatrix} 75,94\\149,15 \end{pmatrix} H,$$

где $F_{\text{max}}^{\kappa n}$ – усилие для классического варианта электромагнита с 2-мя рабочими зазорами; F_{max}^{n} – усилие для многослойных вариантов.

Коэффициент $k_F^{\kappa n}$ отношения максимального усилия классических вариантов к максимальному значению первого эксперимента и коэффициент k_F^n отношения максимального усилия многослойных вариантов к максимальному значению первого эксперимента равны

$$k_F^{\text{KI}} = \begin{pmatrix} 2\\ 3,49 \end{pmatrix}, \ k_F^n = \begin{pmatrix} 1,91\\ 3,75 \end{pmatrix}$$

Таким образом, максимальное увеличение усилия соответствует многослойному варианту с длиной зазора 0,25 мм. Следует заметить, что в классическом варианте с длиной рабочего зазора 0,25 мм максимальное усилие близко к максимальному усилию с многослойным вариантом. Однако если сравнить картины магнитных полей классического варианта с зазором 0,25 мм (см. рисунок 4.6(2)) и многослойного (см. рисунок 4.14(2)), то видно, что в многослойном варианте магнитная индукция в зубцах и зазоре равна 1,0-1,2 Тл, а в классическом более 2,0 Тл. Таким образом, при практически равных усилиях, индукция в многослойном варианте в два раза меньше, что позволяет увеличить МДС катушки и увеличить усилие в квадрате от увеличения ампер-витков. На рисунке 4.17 показан график (оранжевый цвет) усилия многослойного варианта при увеличенном значении ампер-витков катушки с 1800 А до 3000 А, при этом максимальное усилие составило практически 400 Н, т.е. в 2,66 раз больше, чем при классическом варианте с той же длиной рабочего зазора. Магнитная индукция в многослойном варианте составила 1,6 – 1,8 Тл, что соответствует приемлемым рабочим значениям магнитной индукции, в отличии от классического варианта, где индукция достигает значений более 2,0 Тл и практически в 1/3 зубца, т.е. зубцы переходят в режим насыщения.

выводы

1. Проведено исследование влияния ширины зубцов на усилие электромагнита. Выяснено, что максимальное усилие достигается при ширине зубцов в $0,3\tau_z$, при этом увеличение усилия равно 6,9% по сравнению с конструкцией с шириной зубцов $0,5\tau_z$.

2. Проведено исследование влияния длины рабочего зазора на усилие электромагнита в классическом варианте. Выяснено, что с уменьшением длины рабочего зазора, усилие электромагнита увеличивается обратно пропорционально, при этом зависимость усилия от перемещения лайнера имеет линейный вид с максимальным усилием практически в конце перемещения лайнера. При этом индукция в рабочем зазоре и в угловых зонах зубцов в последнем варианте ($k_h = 32$) превышает значение 2 Тл, т.е. зубцы находятся в «насыщении».

3. Спроектирован и изготовлен лабораторный макет электромагнита со съемными полюсами статора и рабочей зоной, позволяющий испытывать как классический вариант с 2-мя рабочими зазорами, так и многослойный с 4-мя зазорами. Проведенные измерения показали увеличение усилия в многослойном варианте лайнера в 2 раза, при уменьшении перемещения лайнера в 2 раза, что подтверждает теоретические положения о многослойных магнитных системах с несколькими рабочими зазорами, представленными в главе № 2.

4. Проведено численное моделирование методом конечных элементов электромагнитов с различным количеством рабочих зазоров (с 2-мя, 4-мя и 8-ю). При этом геометрия магнитной системы и МДС катушки соответствовали лабораторному макету электромагнита. Проведенное моделирование показало увеличение усилия в многослойных вариантах практически пропорционально увеличению количества рабочих зазоров, при сохранении подобия картины магнитных полей в зоне взаимодействия зубцов статора и лайнера, а также при сохранении вида зависимости усилия от перемещения. 5. Сравнение классического 2-х зазорного варианта электромагнита с многослойной конструкцией показало, что максимальные значения усилий при одинаковых длинах зазоров близки в обоих вариантах. Следует учесть, что максимальное значение усилия в классическом варианте достигается в одной точке и зависимость имеет вид наклонного отрезка, а в многослойном максимум достигается практически на всем диапазоне перемещения. При этом магнитная индукция в классическом варианте при уменьшении длины рабочего зазора возрастает до значений более 2 Тл. В многослойном варианте при той же длине зазора, но большем количестве рабочих зазоров магнитная индукция практически не меняется от первоначального значения и находится в районе 1,0 Тл. Т.е при прочих равных условиях в многослойном варианте магнитопровод статора и лайнера позволяет с увеличение МДС катушки увеличить усилие электромагнита в несколько раз.

6. Сравнение классического 2-х зазорного варианта электромагнита с многослойной конструкцией показало, что максимальные значения усилий при одинаковых длинах зазоров, но при разных значениях ампер-витков катушки (1800 А – классический вариант и 3000 – многослойный), в многослойном варианте больше в 2,66 раза, чем в классическом. При этом, магнитная индукция в классическом варианте более 2,0 Тл, а в многослойном находится в рабочем диапазоне 1,6..1,8 Тл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования:

1. Приведены основные положения построения конструкций электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными решетчатыми магнитопроводами ротора и статора с улучшенными массогабаритными показателями. Показаны основные расчетные соотношения, из которых следует возможность многократного увеличения усилия или крутящего момента в заданных габаритах при сохранении магнитодвижущей силы обмоток питания.

2. Показаны конструктивные схемы различных электрических машин и электромагнитных устройств с реализованным принципом построения многослойных магнитопроводов ротора и статора. Приведены основные расчетные соотношения для данных конструкций.

3. Показано, что в линейных вариантах электрических машин и электромагнитных устройств увеличение усилия или крутящего момента прямо пропорционально количеству рабочих зазоров.

4. Проведено исследование влияния длины рабочего зазора на усилие электромагнита в классическом варианте. Выяснено, что с уменьшением длины рабочего зазора усилие электромагнита увеличивается обратно пропорционально, при этом зависимость усилия от перемещения лайнера имеет линейный вид с максимальным усилием практически в конце перемещения лайнера. При этом индукция в рабочем зазоре и в угловых зонах зубцов в последнем варианте ($k_h = 32$) превышает значение 2 Тл, т.е. зубцы находятся в насыщении.

5. Спроектирован и изготовлен лабораторный макет электромагнита со съемными полюсами статора и рабочей зоной, позволяющий испытывать как классический вариант с 2-мя рабочими зазорами, так и многослойный с 4-мя зазорами. Проведенные измерения показали увеличение усилия в многослойном варианте лайнера в 2 раза, при уменьшении перемещения лайнера в 2 раза, что подтверждает теоретические положения о многослойных магнитных системах с несколькими рабочими зазорами, представленными в главе № 2.

6. Проведено численное моделирование методом конечных элементов электромагнитов с различным количеством рабочих зазоров (с 2-мя, 4-мя и 8-ю). При этом геометрия магнитной системы и МДС катушки соответствовали лабораторному макету электромагнита. Проведенное моделирование показало увеличение усилия в многослойных вариантах практически пропорционально увеличению количества рабочих зазоров, при сохранении подобия картины магнитных полей в зоне взаимодействия зубцов статора и лайнера, а также при сохранении вида зависимости усилия от перемещения.

7. Сравнение классического 2-х зазорного варианта электромагнита с многослойной конструкцией показало, что максимальные значения усилий при одинаковых длинах зазоров близки в обоих вариантах. Следует учесть, что максимальное значение усилия в классическом варианте достигается в одной точке и зависимость имеет вид наклонного отрезка, а в многослойном максимум достигается практически на всем диапазоне перемещения. При этом магнитная индукция в классическом варианте при уменьшении длины рабочего зазора возрастает до значений более 2 Тл. В многослойном варианте при той же длине зазора, но большем количестве рабочих зазоров магнитная индукция практически не меняется от первоначального значения и находится в районе 1,0 Тл. Т.е при прочих равных условиях в многослойном варианте магнитопровода статора и лайнера позволяют увеличить МДС обмотки.

8. Сравнение классического 2-х зазорного варианта электромагнита с многослойной конструкцией показало, что максимальные значения усилий при одинаковых длинах зазоров, но при разных значениях МДС катушки (1800 А – классический вариант и 3000 А – многослойный), в многослойном варианте больше в 2,66 раза, чем в классическом. При этом, магнитная индукция в классическом варианте более 2,0 Тл, а в многослойном находится в рабочем диапазоне 1,6..1,8 Тл, что допускает дальнейшее увеличение усилия.

Рекомендации:

1. Проведено исследование влияния ширины зубцов на усилие электромагнита в многослойном варианте. Выяснено, что максимальное усилие достигается при ширине зубцов в $0,3\tau_z$, при этом увеличение усилия равно 6,9% по сравнению с конструкцией с шириной зубцов $0,5\tau_z$.

2. Проведен расчет вариантов реализации цилиндрических машин (шагового реактивного двигателя и синхронного реактивного), учитывающего геометрию рабочей зоны и насыщение ферромагнитного материала. Данный расчет показывает, что при большом количестве рабочих зазоров (больше 5 – 7) происходит уменьшение крутящего момента вследствие явления насыщения. При оптимальном количестве рабочих зазоров (2 – 4) возможно увеличение крутящего момента в 2 – 3,5 раза.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования:

Целесообразно проведение исследований, направленных на разработку методик проектирования, расчета и оптимизации синхронных электрических машин и электромагнитных устройств с учетом обеспечения жесткости элементов многослойной зоны и различных режимов работы машины.

Библиографический список

1. Аванесов, М. А. Применение ANSYS / ЕМАG для автоматизации расчетов статических характеристик линейного шагового двигателя / М. А. Аванесов, В. Е. Луценко // Сборник трудов первой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH / под ред. А.С. Шадского. – М., 2002.

2. Андриянов, А. В. Расчет магнитной системы макета электромагнитного редуктора / А. В. Андриянов, Я. З. Гузельбаев, Г. П. Страхов, А. Ю. Афанасьев, Н. В Давыдов, И. Г. Хисамеев, А. М. Петров, В. А. Денисов // Труды XV Международной научн.-техн. конф. По компрессорной технике. Том II / ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа».– Казань: Изд-во «Слово», 2011. – С. 187 – 192.

3. Афанасьев, А. Ю. Авиационные электромеханические устройства с улучшенными массо-габаритными показателями / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов // Труды IV междун. научно-практ. конференции "Современные технологии" АКТО-2008– Казань, КГТУ, 2008. – С. 113 – 117.

4. Афанасьев, А. Ю. Анализ путей повышения энергоресурсоэффективности системы электродвигатель-редуктор / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов // Материалы XIV международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан».– Казань: Издательство: ООО «Скрипта», 2014. – С. 645 – 647.

5. Афанасьев, А. Ю. Моментный электропривод / А. Ю. Афанасьев. – Казань: Издательство КГТУ, 1997. – 250 с.

 6. Афанасьев, А. Ю. Об электрических машинах с высокими массогабаритными показателями / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов // Сборник материалов XIX Всерос. межвуз. научн.-техн. конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: в 2 ч. Ч. 1. – Казань: Отечество, 2007. – С. 61 – 63.

7. Афанасьев, А. Ю. Основы автоматизированного электропривода: учебное пособие / А. Ю. Афанасьев. – Казань: Издательство КГТУ, 2005. – 125 с.

8. Афанасьев, А. Ю. Электрические машины и электромагнитные устройства с многослойными магнитопроводами / А.Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов // Инновации и инвестиции. – 2015. – № 4. – С. 117–120.

9. Афанасьев, А. Ю. Электрические машины с многослойным ротором и статором / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов // Сб. материалов XX Всерос. межвуз. научн.-техн. конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: в 2 ч. Ч. 1. – Казань: Отечество, 2008. – С. 95 – 97.

Афанасьев, А. Ю. Электромагнитные и магнитные передачи (редукторы и мультипликаторы) с возможностью передачи момента в герметичные объемы / А.
 Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – Казань: Изд-во КГЭУ – 2015. – №7-8. – С. 85 – 91.

11. Балковой, А. П. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями / А. П. Балковский, В. К. Цацекин. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 328 с.

12. Беленький, Ю. М. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов / Ю. М. Беленький, Г. С. Зеленков, А. Г. Микеров. – Л.: ЛДНТП, 1987. – 28 с.

13. Бурковская, Т. А. Исследование магнитных систем электродвигателей с внутриякорным индуктором / Т. А. Бурковская, Ю. В. Писаревский // Электротехнические комплексы и системы управления.– 2007.– № 2. – С. 71 – 76.

14. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования. 3-е изд., перераб. / В. А. Веников, Г. В. Веников – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.

15. Вольдек, А. И. Электрические машины: учеб, для вузов / А. И. Вольдек – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 832 с.

16. Давыдов, Н. В. Синхронный двигатель с реактивным многослойным ротором / Н. В. Давыдов // XIV Туполевские чтения: Международная молодёжная научная конференция, 10-11 ноября 2006 года: Материалы конференции, том II, Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 109 – 110. 17. Давыдов, Н. В. Численное моделирование электромагнитных мультипликаторов / Н. В. Давыдов // Инновации и инвестиции. – 2015. – № 3. – С. 178 – 180.

18. Давыдов, Н. В. Шаговый двигатель с многослойным ротором / Н. В. Давыдов // Ш Республиканская научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Автоматика и электронное приборостроение": Материалы конференции, Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – С. 64 – 65.

19. Давыдов, Н. В. Электрические машины с многослойным ротором и статором / Н. В. Давыдов // XVI Туполевские чтения: Международная молодёжная научная конференция, 28-29 мая 2008 года: Материалы конференции, том II, Казань: Издательство Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 333 – 335.

20. Давыдов, Н. В. Электрические машины с улученными энергетическими и массогабаритными показателями / Н. В. Давыдов // XV Туполевские чтения: Международная молодёжная научная конференция, 9-10 ноября 2007 года: Материалы конференции, том II, Казань: Издательство КГТУ, 2007. – С. 249 – 251.

21. Давыдов, Н. В. Энерго- и ресурсосбережение в электрических машинах / Н. В. Давыдов // Материалы IX международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». – Казань, 2008. – С. 236 – 242.

22. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под общ. Ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.

23. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

24. Ивоботенко, Б. А. Проектирование шагового электропривода / Б. А. Ивоботенко, В. Ф. Козаченко: под ред. Л.А. Садовского. – М.: МЭИ, 1985. – 100 с.

25. Ивоботенко, Б. А. Физические принципы и структуры электрического дробления шага в дискретном электроприводе / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, С. С. Кожин // Труды МЭИ. Темат. сб. 1979. Вып. 440. – С. 5 – 20.

26. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. М. Рац.– Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

27. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: Учебн. для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. К. Токарев – 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.

28. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

29. Крицштейн, А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Крицштейн. – Ульяновск: Изд.во УлГТУ, 2005. – 83 с.

30. Кудряшов, С. В. Способ расчета потерь в стали индукторного двигателя/ С. В. Кудряшов // ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. – 2008. – № 4. – С. 1 – 8.

31. Кузнецов, В. А. Вентильно-индукторные двигатели / В. А. Кузнецов, В. А. Кузьмичев. – М.: Изд. МЭИ, 2003. – 70 с.

32. Огарь, В. А. Определение потерь в стали асинхронного двигателя / В. А.
Огарь// Наукові праці ДонНТУ – Електротехніка і енергетика. – 2008. – № 8. – С.
82 – 85.

33. Пат. 2321140 РФ, МПК Н02К 19/06, 19/00. Синхронный электродвигатель
/ А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патенобладатель КГТУ им. А.Н.
Туполева. – 2006142111/09; заявл. 02.11.2006; опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9.

34. Пат. 2321144 РФ, МПК Н02К 37/02. Шаговый электродвигатель / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патенобладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2006142110/09, заявл. 02.11.2006; опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9.

35. Пат. 2356155 РФ, МПК Н02К 19/06, 16/00, 21/12. Синхронный электродвигатель/ А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патенобладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008114250/09, заявл. 11.04.2008; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14.

36. Пат. 2366018 РФ, МПК Н01F 7/13. Электромагнит / А. Ю. Афанасьев, Н.
В. Давыдов; заявитель и патенобладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008114232/09, заявл. 11.04.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24.

37. Пат. 2366064 РФ, МПК Н01К 41/02. Линейный электродвигатель / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патенобладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008114233/09, заявл. 11.04.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24.

38. Пат. 2366066 РФ, МПК Н02К 41/03. Линейный шаговый электродвигатель / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов, В. Т. Герасименко; заявитель и патенобладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008114251/09, заявл. 11.04.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24.

39. Пат. 2369954 РФ, МПК Н02К 49/06, F16D 27/115. Электромагнитная муфта
/ А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патенобладатель КГТУ им. А.Н.
Туполева. – 2008114249/09, заявл. 11.04.2008; опубл. 10.10.2009, Бюл. № 28.

40. Пат. 2369955 РФ, МПК Н02К 51/00, F16Н 1/06. Магнитный редуктор / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патенобладатель КГТУ им. А.Н. Ту-полева. – 2008114250/09, заявл.11.04.2008; опубл. 10.10.2009, Бюл. № 28.

41. Пат. 2375806 РФ, МПК Н02К 19/06, 19/10, 16/00, 21/12. Синхронный электродвигатель с магнитной редукцией / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патенобладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008139836/09, заявл. 07.10.2008; опубл. 10.12.2009; Бюл. № 34.

42. Пат. на полезную модель 118136, МПК Н02К 51. Магнитный редуктормультипликатор/ Н. В. Давыдов; заявитель и патенобладатель Давыдов Н.В. – 2012103578/07, заявл. 02.02.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. №19.

43. Попов, Т. Энергоэкономные ферритовые трансформаторы / Т. Попов, Л. Фенерджиев, Д. Иванов // Problems of engineering cybernetics and robotics.– София.– 2005. – № 55. – С. 45–52.

44. Постоянные магниты справочник: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина.– М.: Энергия, 1971. – 376 с.

45. Прохоров, С. Г. Электрические машины: Учебное пособие / С. Г. Прохоров, Р. А. Хуснутдинов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2002. – 140 с.

46. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский – 2-е изд.– М.: Изд.во Академия, 2007. – 272 с.

47. Справочник по электрическим машинам: в 2 т./ под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова.– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

48. Столов, Л. И. Авиационные моментные двигатели / Л. И. Столов, Б. Н. Зыков, А. Ю. Афанасьев, Ш. С. Галеев. – М.: Машиностроение, 1979. – 136 с.

49. Столов, Л. И. Моментные двигатели постоянного тока / Л. И. Столов, А.
Ю. Афанасьев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с.

50. Столов, Л. И. Моментные двигатели с постоянными магнитами / Л. И. Столов, Б. Н. Зыков. – М.: Энергия, 1977. – 112 с.

51. Ся Бэньчун. Исследование и разработка вентильных реактивных двигателей: Дис. ... канд. тех. наук. М., 1994. – 169 с.

52. Тумаева, Е. В. Синхронный электропривод с оптимальными режимами работы. дис канд. техн. наук: 05.09.03// Казанский государственный технологический университет нижнекамский химико-технологический институт.– Нижнекамск, 2006. –176 с.

53. Уайт, Д.: Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.; Л.: Энергия, 1964. – 527 с.

54. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частот / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

55. Электрические машины / [Г. Н. Петров, Н. В. Горохов, Ф. А. Горяинов и др.; под ред. Г. Н. Петрова]. – М.: Гос. Энергетическое изд-во, 1940.– Ч.1.– 663 с.

56. Электротехнический справочник: Т.1. Электротехнические материалы / под общ. ред. В. Г. Герасимова и др. – 9-е изд. Стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440 с.

57. Allnianese, C. Modelling and control of surface- mounted PM motors including saturation effects / C. Allnianese, V. Nardi, G. Tomasso // Proc. of IEEE Intern. Electric Machines and Drives Conf., 2004. – P. 667 – 668.

58. Balazovic P. 3-Phase Switched Reluctance Motor Control with Encoder Using DSP56F80x / P. Balazovic, R. Visinka // Motorola AN 1937/D, 2002. – 56 p.

59. Bianchi, N. Design techniques for reducing the cogging torque in surfacemounted PM motors / N. Bianchi, S. Bolognani // IEEE Trans. Industry Appl. 2002. Vol. 38. № 1. – P. 1259 – 1265.

60. Chung, D. -W. Analysis and Compensation of Current Measurement Error in Vector-Controlled AC Motor Drives / D. -W. Chung, S. -K. Sul // IEEE Trans. Industry Appl. 1998. Vol. 34. № 2. – P. 340 – 345.

61. Colombi, S. Improvement of brashless DC motor actuators / S. Colombi, T. Raimondi // Symposium ISIR92: 23rd Intern. Symp. on Industrial Robots. Barcelona, Spain, 1992.

62. Dhaouadi, R. Analysis of current-regulated voltage-source inverters for permanent magnet synchronous motor drives in normal and extended speed ranges / R. Dhaouadi, N. Mohan // IEEE Trans. Energy Conversion. – 1990. Vol. 5. Issue 1. – P. 137 – 144.

63. Direct Drive Motors: Fast and Accurate // Machine Design Magazine. February. 1999.

64. Duaid, A. E.3-DOF closed-loop control for planar linear motor / A. E. Duaid, R.
L. Hollis // Proc. of the IEEE 1998 Intern. Conf. on Robotics & Automation. Leuven, Belgium. May 1998. – P. 2488 – 2493.

65. Fitzgerald, A. E. Electric Machinery / A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans. – Tokyo: McGraw-Hill Intern. Book Company, 1983. – 688 p.

66. Holtz, J. Identification and compensation of torque ripple in high-precision permanent magnet motor drives / J. Holtz // IEEE Trans, on Industrial Electronics. – 1996. – N_{2} 2. – P. 309 –320.

67. Kato, S. Recent development of NSK direct drive motors / S. Kato // NSK Motion and Control. 1999. No 6. – P. 16 – 24.

68. Kim, J.-M. Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation / J.-M. Kim, S. -K. Sul // IEEE Trans. Industry Appl. 1997. Vol. 33. N_{2} 1. – P. 43 – 48.

69. Lee, B. K. Advanced BLDC motor drive for low cost and high performance propulsion system in electric and hybrid vehicles / B. K. Lee, M. Esani // Proc. of IEEE Intern. Electric Machines and Drives Conf., 2001.

70. Matsui, N. Autocompensation of torque ripple of direct drive motor by torque observer / N. Matsui, T. Makino, H. Satoh // IEEE Trans. Industry Appl., 1993. Vol. 29. Issue 1. Part 1. – P. 187 – 194.

71. Miller, T. J. E. Switched Reluctance Motors and Their Control / T. J. E. Miller.
– Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993. – 200 p.

72. Morimoto, S. Current phase control methods for permanent magnet synchronous motors / S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasa // IEEE Trans. Power Electronics. 1990. Vol. 5. №2. – P. 133 – 139.

73. Morimoto, S. Effects and compensation of magnetic saturation in fluxweakening controlled permanent magnet synchronous motor drives / S. Morimoto, S. Masayuki, Y. Takeda // IEEE Trans. Industry Appl. 1994. Vol. 30. № 6. – P. 1632 – 1637.

74. Morimoto, S. Optimum machine parameters and design of inverter-driven syncluuim motors for wide constant power operation / S. Morimoto, M. Sanada, Y. hit., and K. Taniguchi // Proc. of the IEEE Industry Applications Society Meeting, Denver, Colorado, 1994. Vol. 1. - P. 177 - 182.

75. Motion systems overview [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <u>http://www.etel.ch/motion-systems/overview/</u> (Дата обращения: 02.03.2015)

76. Oswald, J. Direktantriebe mit permanenterregten Synchronmaschinen / J. Oswald T. Maier, O. Teigelkotter, D. Schmitt // DE/VDI Tagung Elektrisch-mecha nische Antriebssysteme. 2004. – P. 495 – 509.

77. PEANESERV Planar Servomotor / Yokogama Technical Report. English Edition. – 2001. № 32. – 8 p.

78. Pelta, E. R. Two-axis Sawyer motor for motion systems / E. R. Pelta // IEEE Control Systems Magazine. 1987. October. – P. 20–24.

79. Petrovic, V. Modelling of PM synchronous motors for common and estimation tasks / V. Petrovic, A. M. Stankovic // Proc. of the 40th IEEE Conf. on Decision and Conn Orlando, Florida USA, December 2001. – P. 2229 – 2234.

80. Quaid A.E., Xu Y., Hollis R.L. Force characterization and commutation of planar linear motors // Proc. of the IEEE 1997 Intern. Conf. on Robotics & Automation. Albuquerque, Belgium, April 1997.

81. Raumschussel, E. Nichtlineares Modell ein Linearschrittmotor der Basis von Daten aus der Magnetfeldberechnung / E. Raumschussel, R. Lipfert // 45th Intern. Sci.
Conference of Technical University llmenau. October 04 – 06. 2000. – P. 529 – 534.

82. Roozbeh, Molavi. Optimal control strategies for speed control of permanentmagnet synchronous motor drives / Molavi Roozbeh, A. Khaburi Davood // Proceedings of world academy of science, engineering and technology. – Vol. 34.– October 2008. – P. 428–432.

83. Sanada, M. Interior permanent magnet linear synchronous motor for highperformance drives / M. Sanada, S. Morimoto, Y. Takeda // IEEE Trans, on Industry App, 1997. Vol. 33. № 4. – P. 966 – 972.

84. Sebastian, T. Transient modeling and performance of variable- speed permanent-magnet motors / T. Sebastian, G. R. Slemon // IEEE Trans, on Industry Appl. 1989. Vol. 25. №1. – P. 101 – 106.

85. Springhob, L. Synchron-Servoantrieb mit hoher Rundlaufgute und Selbstinbe-Iriebnahmefunktion / L. Springhob // Fachbereich Elektrotechnik. Bergishe Universitat-Gesa- mthochschule Wuppertal, 1994.

86. Technical instruction for the permanent magnet synchronous torque motors of the series ROL. TNA 783. VUES. Brno, 2005. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <u>http://www.vues.cz</u> (Дата обращения: 02.04.2015)

87. Urasaki, N.Relationship of parallel model and series model for permanent magnet synchronous motors taking iron loss into account / N. Urasaki, N. Senjyu, K. Uezato // IEEE Trans, on Energy Conversion. 2004. Vol. 19. № 2. – P. 265 – 270. 88. Viorel, I. -A. Modular hybrid linear and surface stepper motors / I. -A. Viorel, L. Szabo, J. B. Dobai // Research results. Department of electrical machines, marketing and management. Technical University of Cluj-Napoca. 2003. – 27 p.

89. Weigel, J. Enhansed disturbance rejection due to highly dynamic parameteradaptive control of saturated PM linear motor / J. Weigel, P. Mutschler // Proc. of IEEE Industry Appl. Conf., 2005. – P. 723 – 730.

90. YSB series megatorque motor / NSK Motion and Control. -2003. No 14. -P. 43 - 44.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Пример расчета ШД в ПО Mathcad 14.0

Исходные данные к расчету

$$P_n := 4000 \cdot W$$
 Номинальная мощность
 $U_n := 400 \cdot V$ Номинальное напряжение
 $i_{red_k1} := 3$ Коэффициент редукции ротора
 $f_n := \frac{3000}{i_{red_k1}} \cdot \frac{1}{min} = 16.6667 \frac{1}{s}$
 $w_n := 2 \cdot \pi f_n = 104.7198 \frac{1}{s}$ Номинальная частота вращения
 $KPD_n := 90 \cdot \% = 0.9$

Расчет параметров ИМ

$$M_{EM} := \frac{P_n}{w_n} = 38.1972 J$$
 Mor

Иомент электромагнитный

Исходные данные

Выбираем удельное значение момента для общепромышленного ВИД

$$M_{ud} = \frac{M_{EM}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_R^2 \cdot L_0}$$
$$M_{ud} := 5.6 \cdot \frac{kN \cdot m}{m^3} = 5.6 \times 10^3 Pa$$

Для общепромышленных ВИД мощностью 1..100 кВт - 2,36..5,6

Выбрав значение удельного электромагнитного момента легко определить объем ротора V_r и произведение $D_R^{-2} \cdot L_0$

$$D_R^2 \cdot L_0 = \frac{M_{EM}}{M_{ud} \cdot \frac{\pi}{4}} = C_0$$

$$k_{\rm D} = rac{{
m L}_0}{{
m D}_{
m R}} = 1$$
 Рекомендуемые значения 0,5..2,0 $k_{\rm D} \coloneqq 1$

$$D_{R} := \sqrt[3]{\frac{M_{EM}}{M_{ud} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot k_{D}}} = 0.2056 \,\mathrm{m}$$

Диаметр ротора

Определение геометрических размеров зубцовой зоны статора и ротора

$$D_{R_V} := 200 \cdot \text{mm}$$
 $L_0 := k_D \cdot D_R = 0.2 \text{ m}$ Длина ротора
 $del_0 := 0.005 \cdot D_R = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$
 $del_0 := 1 \cdot \text{mm}$ Рабочий зазор
 $D_S := D_R + 2 \cdot del_0 = 0.202 \text{ m}$ Диаметр расточки статора
 $D_0 := D_S \cdot 1.73 = 0.3495 \text{ m}$ Наружный диаметр статора
 $D_0 := 350 \cdot \text{mm}$

Выбираем конфигурацию 8/6

Расчет геометрии классической конструкции

$$\begin{split} & Z_{S} \coloneqq 8 & \text{Количество зубцов статора} \\ & Z_{R} \coloneqq 6 & \text{Количество зубцов ротора} \\ & m_{0} \coloneqq 4 & \text{Число фаз} \\ & \text{beta}_{S} \coloneqq \frac{360}{Z_{S} \cdot 2} = 22.5 & \text{Угловой размер полюса статора} \\ & \text{beta}_{R} \coloneqq \frac{360}{Z_{R} \cdot 2} = 30 & \text{Угловой размер полюса ротора} \\ & \text{beta}_{S} \coloneqq 21 \cdot \text{deg} & \text{Угловой размер полюса статора} \\ & \text{beta}_{R} \coloneqq 23 \cdot \text{deg} & \text{Угловой размер полюса ротора} \\ & \text{beta}_{S} \coloneqq 23 \cdot \text{deg} & \text{Угловой размер полюса ротора} \\ & \text{beta}_{S} \coloneqq 23 \cdot \text{deg} & \text{Угловой размер полюса ротора} \\ & \text{beta}_{S} \coloneqq D_{S} \cdot \sin\left(\frac{\text{beta}_{S}}{2}\right) = 0.0368 \,\text{m} \end{split}$$

$$b_{zR} := D_R \cdot sin \left(\frac{beta_R}{2} \right) = 0.0399 m$$

 $D_{YS} := D_0 - 2 \cdot 0.6 \cdot b_{zS} = 0.3058 m$ Диаметр спинки статора (0.5..0.7)
 $D_{XSV} := 305 \cdot mm$
 $h_{zS} := \frac{D_{YS} - D_S}{2} = 0.0515 m$
 $h_{zR} := 27 \cdot del_0 = 0.027 m$ Высота зубца ротора >= (20..30)del
 $h_{zRV} := 27 mm$

Сравнительный расчет

$$del_0 = 1 \times 10^{-3} \, m$$

 $D_R = 0.2 \, m$
 $D_S = 0.202 \, m$
 $L_0 = 0.2 \, m$
 $B_0 := 1.4 \cdot T$ Магнитная индукция в рабочем зазоре
 $p := 1$

$$M_{kl} := p \cdot \frac{B_0^2 \cdot \frac{DS}{2} \cdot del_0 \cdot L_0}{\mu_0} = 31.5063 J$$

$$F_{kl} := \frac{M_{kl}}{\frac{D_S}{2}} = 311.9437 \,\mathrm{N}$$

$$M_{EMA} := \frac{P_n}{w_n} = 38.1972 J$$
$$L_{0_2} := L_0 \cdot \frac{M_{EM}}{M_{kl}} = 0.2425 m$$

<u>L</u>_Q:= 242.5⋅mm

-136-

$$\underbrace{\mathbf{M}_{kkl}}_{\mu 0} := \mathbf{p} \cdot \frac{\mathbf{B}_0^2 \cdot \frac{\mathbf{D}_S}{2} \cdot \mathrm{del}_0 \cdot \mathbf{L}_0}{\mu_0} = 38.2014 \,\mathrm{J}$$

Общие исходные данные

$del_0 = 1 \times 10^{-3} \mathrm{m}$			
$D_{S} = 0.202 \mathrm{m}$			
$L_0 = 0.2425 \mathrm{m}$			
$B_{max} := 1.6 \cdot T$	Магнитная индукция на внутреннем рабочем зазоре с учетом насыщения		
$B_0 = 1.4 \mathrm{T}$	Магнитная индукция на наружнем рабочем зазоре		
$\mathbf{B}_1 \coloneqq \mathbf{B}_0$			
$m_0 = 4$	количество фаз		
, p ,:= 1	количество пар полюсов		
k _h := 30	отношение высоты зубца(ферромагнитных эле- ментов) к длине рабочего зазора		
$R_1 := \frac{D_S}{2} = 0.101 \mathrm{m}$	радиус наружный ротора		
$k_{del0} := \frac{R_1}{del_0} = 101$	Коэффициент отношения радиуса рабочего зазора к его длине (радиус арбочего зазора берется по наружному диаметру ротора/полого цилиндра ротора)		
Расчет для 2-х зазорного варианта			
z _p := 2	оличество зубцов на полюсе статора		

² p ·- ²	Коли всегье зусцов на нолюсе статора				
$n := z_p$	Количе	Количество рабочих зазоров			
$R_{R_1} \coloneqq R_1$	R ₁ =	= 0.101 m			
j := 2 n	i := 1 n	n = 2	$del_0 = 1 \times 10^{-3} \mathrm{m}$		
Eps := 0.0	001		Ū		

-137-

$$\begin{split} \operatorname{Procl}(n,R_{1},\operatorname{Eps},k_{h}) &\coloneqq & \left| \begin{array}{l} k_{del} \leftarrow \frac{R_{1}}{\frac{del_{0}}{n}} \\ del_{S} \leftarrow 0 \cdot mm \\ & \\ & \\ & \\ Eps_{t} \leftarrow \frac{del_{0} - del_{S}}{del_{0}} \\ & \\ & \\ while \quad Eps_{t} \geq Eps \\ & \left| \begin{array}{l} R_{S_{1}} \leftarrow R_{1} \\ del_{1} \leftarrow \frac{R_{S_{1}}}{k_{del}} \\ h_{1} \leftarrow k_{h} \cdot del_{1} \\ & \\ for \quad i \in 2 \dots n \\ & \left| \begin{array}{l} R_{S_{i}} \leftarrow R_{S_{i-1}} - del_{i-1} - h_{i-1} \\ & \\ del_{i} \leftarrow \frac{R_{S_{i}}}{k_{del}} \\ & \\ h_{i} \leftarrow k_{h} \cdot del_{i} \\ & \\ del_{S} \leftarrow \sum_{j=1}^{n} del_{j} \\ & \\ & \\ Eps_{t} \leftarrow \frac{del_{0} - del_{S}}{del_{0}} \\ & \\ & \\ k_{del} \leftarrow k_{del} - k_{del} \cdot \frac{del_{0} - del_{S}}{del_{0}} \\ & \\ & \\ h_{n} \leftarrow h_{n} 0.6 \\ & \\ & \\ Result \leftarrow \left(\begin{array}{c} R_{S} \\ \\ h_{k_{del}} \cdot mm \end{array} \right) \\ \end{array} \right) \end{split}$$

$$R_{S} := \operatorname{Proc1}(n, R_{1}, \operatorname{Eps}, k_{h})_{1}$$

$$del := \operatorname{Proc1}(n, R_{1}, \operatorname{Eps}, k_{h})_{2}$$

$$h := \operatorname{Proc1}(n, R_{1}, \operatorname{Eps}, k_{h})_{3}$$

$$k_{del} := \operatorname{Proc1}(n, R_{1}, \operatorname{Eps}, k_{h})_{4} \cdot \frac{1}{mm}$$

$$\operatorname{Eps} = 1 \times 10^{-3}$$

$$R_{S} = \begin{pmatrix} 0.101 \\ 0.0841 \end{pmatrix} m \quad del = \begin{pmatrix} 5.4532 \times 10^{-4} \\ 4.5405 \times 10^{-4} \end{pmatrix} m \quad h = \begin{pmatrix} 0.0164 \\ 8.1729 \times 10^{-3} \end{pmatrix} m$$
$$k_{del} = 185.095$$
$$del_test := \sum_{i=1}^{n} del_{i} = 9.9937 \times 10^{-4} m$$

Bn =
$$\begin{pmatrix} 1.4 \\ 1.6 \end{pmatrix}$$
T R_S = $\begin{pmatrix} 0.101 \\ 0.0841 \end{pmatrix}$ m del = $\begin{pmatrix} 5.4532 \times 10^{-4} \\ 4.5405 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$ m

$$k_{del_real} = \begin{pmatrix} 185.2118 \\ 185.2118 \end{pmatrix} \qquad k_{del} = 185.095$$

$$M_{i} := z_{p} \cdot p \cdot \frac{(Bn_{i})^{2} \cdot R_{S_{i}} \cdot del_{i} \cdot L_{0}}{\mu_{0}} \qquad M = \begin{pmatrix} 41.6641 \\ 37.7263 \end{pmatrix} J$$

$$M_{-n} := \sum_{i=1}^{n} M_{i} \qquad M_{-n} = 79.3904 J$$

n = 2 количество рабочих зазоров $k_{m_n} := \frac{M_{-n}}{M_{kl}} = \dots$ $k_{m_n} = 2.0782$

$$M_{i_{n}} := z_{p} \cdot p \cdot n \cdot \frac{B_{0}^{2} \cdot R_{1}^{2} \cdot L_{0}}{\mu_{0} \cdot k_{del}} = \dots \qquad M_{i_{n}} = 83.3808 J$$

$$M_{i_{n}} := \sum_{i=1}^{n} \left[z_{p} \cdot p \cdot \frac{\left(B_{0} \cdot \frac{R_{1}}{R_{S_{i}}}\right)^{2} \cdot R_{S_{i}} \cdot del_{i} \cdot L_{0}}{\mu_{0}} \right] = \dots \qquad M_{i_{2_{n}}} = 83.3282 J$$

$$k_{mi_{n}} := \frac{M_{i_{n}}}{M_{kl}} = \dots \qquad k_{mi_{n}} = 2.1827$$

Расчет магнитной индукции без насыщения

$$B_1 \cdot R_1 = \text{const}$$

$$BR := B_1 \cdot R_1 = 0.1414 \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}^2}$$

$$B_i := B_1 \cdot \frac{R_1}{R_{\text{S}_i}} \qquad B = \begin{pmatrix} 1.4 \\ 1.6814 \end{pmatrix} T \qquad Bn = \begin{pmatrix} 1.4 \\ 1.6 \end{pmatrix} T$$

Результаты расчета

 $k_{del} = 185.095$

Параметры рабочей зоны

 $R_{S} = \begin{pmatrix} 0.101 \\ 0.0841 \end{pmatrix} m$ Радиусы рабочих зазоров $del = \begin{pmatrix} 5.4532 \times 10^{-4} \\ 4.5405 \times 10^{-4} \\ 0.0164 \end{pmatrix} m$ Длины рабочих зазоров $h = \begin{pmatrix} 8.1729 \times 10^{-3} \end{pmatrix} m$ Высота полого цилиндра ротора и зубцов внутреннего статора

Коэффициент отношения радиуса зазора к его длине

del_test :=
$$\sum_{i=1}^{n} del_i = 9.9937 \times 10^{-4} m$$

Проверка длины рабочего зазора

Результаты расчета с учетом насыщения

$$Bn = \begin{pmatrix} 1.4 \\ 1.6 \end{pmatrix} T$$
Магнитная инудкция в рабочих зазрах $M = \begin{pmatrix} 41.6641 \\ 37.7263 \end{pmatrix} J$ Крутящий момент рабочих зазоров $M_{-n} = 79.3904 J$ Полный крутящий момент $k_{m_n} = 2.0782$ Коэффициент отношения крутящего момента 2-х зазорного варианта с классическим

Результаты расчета без учета насыщения

$$B = \begin{pmatrix} 1.4 \\ 1.6814 \end{pmatrix}$$
T Магнитная индукция в рабочих зазорах
 $M_{i2_n} = 83.3282 J$ Полный крутящий моент
 $k_{mi_n} = 2.1827$ Коэффициент отношения крутящего момента 2-х зазорного
варианта с классическим без учета насыщения

ПРИЛОЖЕНИЕ Б





ПРИЛОЖЕНИЕ В