

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Казань 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ» (КНИТУ-КАИ) на кафедре «Электрооборудование».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Афанасьев Анатолий Юрьевич

Официальные оппоненты: **Идиятуллин Ринат Гайсович**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», кафедра «Электротехнические комплексы и системы», профессор

Опалев Игорь Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент, АО «Электропривод» (г. Киров), ведущий конструктор-руководитель проектов

Ведущая организация: **федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Оренбургский государственный университет"**

Защита состоится «13» апреля 2018 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 (учебный корпус № 3), зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан « 10 » января 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

В настоящее время электрический привод является основным типом привода. Его силовым узлом является электрический двигатель. Используются различные типы электрических двигателей: асинхронный, синхронный, двигатели постоянного тока и т.д. Однако в задачах прямого привода, прецизионных приводах, приводах высоких массогабаритных показателей основными 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 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. Не менее актуальной стоит задача ресурсосбережения – 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 реактивным ротором.

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 – синхронные электрические машины (СЭМ) и электромагнитные устройства (ЭМУ) (муфты, редукторы, мультипликаторы, электромагниты) с многослойными магнитопроводами ротора и статора.

Предмет исследования – массогабаритные показатели СЭМ и ЭМУ с многослойными магнитопроводами ротора и статора.

Цель работы – создание новых типов СЭМ и ЭМУ с многослойными магнитопроводами с улучшенными массогабаритными показателями.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1. Разработка новых конструктивных схем СЭМ и ЭМУ с многослойными магнитопроводами, обладающих улучшенными массогабаритными показателями.
2. Создание компьютерных моделей и аналитических методик расчета магнитных систем и параметров СЭМ и ЭМУ с многослойными магнитопроводами.
3. Создание опытного образца электромагнитного устройства с многослойными магнитопроводами и экспериментальное исследование его характеристик.
4. Сопоставление экспериментальных и расчетных параметров СЭМ и ЭМУ с многослойными магнитопроводами и калибровка математических моделей.
5. Разработка рекомендаций по расчету и проектированию новых типов СЭМ и ЭМУ 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 СЭМ и ЭМУ с улучшенными массогабаритными показателями.
2. Предложены конструктивные схемы СЭМ и ЭМУ с многослойными магнитопроводами.
3. Получены аналитические зависимости выходных характеристик и параметров СЭМ и ЭМУ с многослойными магнитопроводами, учитывающих многослойную геометрию магнитопроводов.
4. Разработаны модели для численного расчета магнитных полей, параметров и выходных характеристик СЭМ и ЭМУ 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 СЭМ и ЭМУ с многослойными магнитопроводами, заключающаяся в предварительном 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 СЭМ и ЭМУ 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 улучшенными массогабаритными показателями.
2. Разработаны алгоритмы расчета геометрии многослойной рабочей зоны и параметров СЭМ и ЭМУ 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 КНИТУ-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 Международная молодежная научная конференция «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 международная научно-практическая конференция «Современные технологии АКТО» (г. Казань, 2008 г.), XV международная научно-техническая конференция 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).

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 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности проблемы, цель и задачи исследования, основные научные положения и результаты, выносимые на защиту, краткое изложение диссертации по главам.

В первой главе проведен анализ современного состояния технических решений в области электрических машин и электромагнитных устройств с высокими показателями удельного момента к массе/объему.

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 выполнены также большими. Использование магнитной редукиции в крупных машинах приводит к уменьшению размеров зубцов и рабочих зазоров и к недоиспользованию обмотки по МДС.

На основе проведенного анализа были поставлены следующие задачи:

– 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;

– 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;

– необходимо найти основные расчетные соотношения и составить методику расчета для разработанных конструкций;

– 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;

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

Во второй 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 электромагнитное усилие и электромагнитный момент зависят от многих факторов, но в рамках настоящей работы рассматривались только вопросы рациональной конструкции и размеров, остальные факторы считались фиксированными.

Для увеличения электромагнитного момента предлагается увеличить количество поверхностей взаимодействия, введя полые цилиндры ротора и статора, состоящие из чередующихся ферромагнитных и немагнитных элементов. На рисунке 1, *а* показаны зубцы статора и лайнера (плоский вариант ротора) крупной электрической машины.

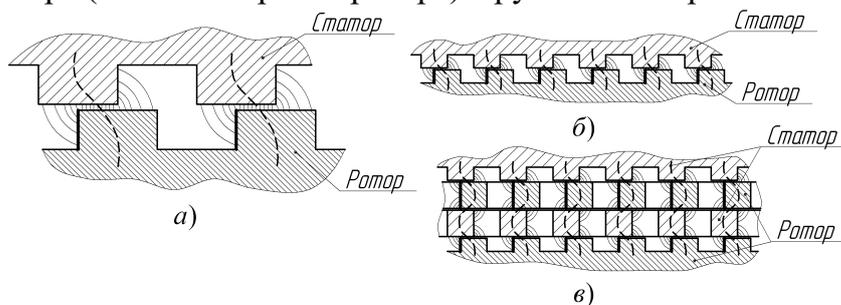


Рисунок 1 – Зона зазора машины: *а* – без магнитной редукции; *б* – с магнитной редукцией; *в* – с магнитной редукцией и двумя дополнительными пластинами

Касательная сила, возникающая при взаимодействии зубцов лайнера и статора

$$F_1 = B^2 S / (2\mu_0), \quad (1)$$

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

На рисунке 1, *б* показана та же электрическая машина при использовании магнитной редукции. Число зубцов увеличено в три раза, но их высота и воздушный зазор для сохранения картины поля уменьшены в три раза. В результате касательное усилие и момент (в случае цилиндрической машины) на рис. 1, *а* и *б* совпадают, а обмотки на рис. 1, *б* недоиспользуются по магнитодвижущей силе (МДС).

На рис. 1, в показаны зубцы статора и лайнера той же крупной машины при использовании магнитной редукции и двухслойного лайнера и статора. Число зубцов и магнитная индукция те же, что и на рис. 1, б. Однако лайнер имеет пластину, толщина которой в два раза больше высоты зубца. Пластина имеет ферромагнитные элементы, разделенные немагнитным материалом (не заштрихованы) и расположенные напротив зубцов ротора. Статор имеет аналогичную пластину, ее ферромагнитные элементы находятся напротив зубцов статора. Воздушные зазоры те же, что и на рис. 1, б, а общий зазор и площадь S в три раза больше. Приходим к выводу, что касательное усилие машины по рис. 1, в в три раза больше, чем по рис. 1, а, при тех же размерах и МДС обмоток. При использовании двух пластин ротора и двух статора суммарное усилие возрастает в пять раз. 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.

$$F = nmF_1, \quad (2)$$

где F – полное усилие; F_1 – усилие, создаваемое взаимодействием зубца ротора и статора; n – количество рабочих зазоров; m – количество зубцов.

Предлагаемое техническое решение было реализовано в различных конструкциях электрических машин, приведенных ниже.

Шаговый электродвигатель. Конструкция многослойного шагового электродвигателя (ШД) показана на рисунке 2. Пакет статора 2 установлен в корпусе 1 и имеет полюсы, на каждом из которых размещена одна из фаз обмотки 3 – А, В и С. На поверхностях полюсов, обращенных к зазору, имеются зубцы. Зубцы на соседних полюсах сдвинуты на треть зубцового деления.

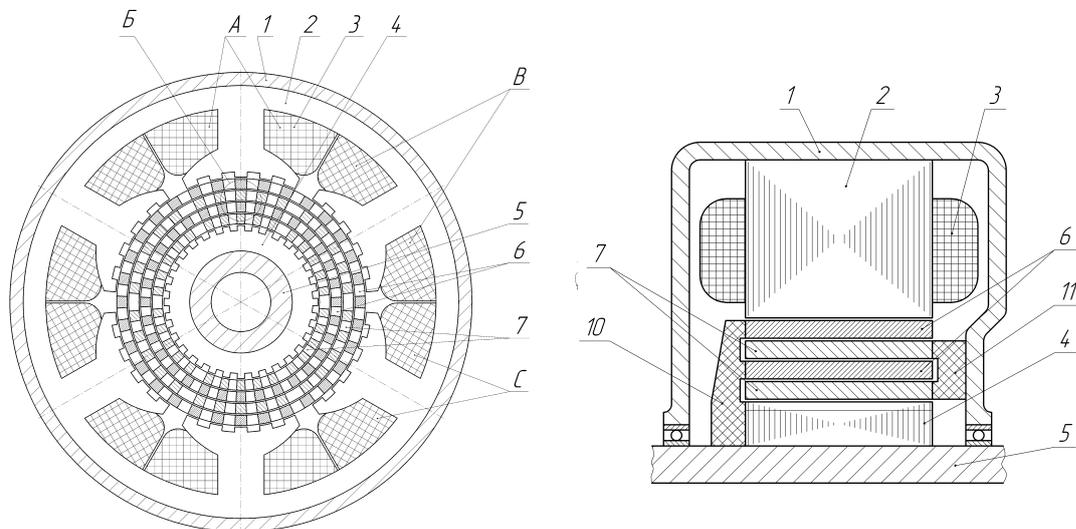


Рисунок 2 – ШД с многослойным ротором и статором

Магнитопровод ротора 4 размещен на валу 5 и имеет на наружной поверхности зубцы с тем же угловым шагом, что и зубцы на полюсах статора. Между зубцами полюсов статора и магнитопровода ротора имеются чередующиеся коаксиальные полые цилиндры ротора 6 и статора 7, причем цилиндры ротора механически связаны с магнитопроводом ротора через немагнитный диск 10, а цилиндры статора крепятся к корпусу немагнитной втулкой 11, при этом зубцы полюсов и ферромагнитные элементы 8 цилиндров статора, а также зубцы магнитопровода и ферромагнитные элементы 8 цилиндров ротора имеют свои одинаковые угловые положения.

Полный момент шагового электродвигателя равен

$$M = z_{\Pi} p (2m + 1) (R_1 - 2mh)^2 \frac{B_{\delta \max}^2 L}{\mu_0 k_{\delta}}, \quad (3)$$

где $B_{\delta \max}$ – максимальное значение магнитной индукции; μ_0 – магнитная постоянная; R_1 – радиус ротора; L – активная длина двигателя; $k_{\delta} = R_i / \delta_i = \text{const}$ – коэффициент отношения радиуса рабочего зазора и его длины; z_{Π} – количество зубцов полюса статора, p – количество пар полюсов; m – число полых цилиндров ротора; h – толщина полого цилиндра.

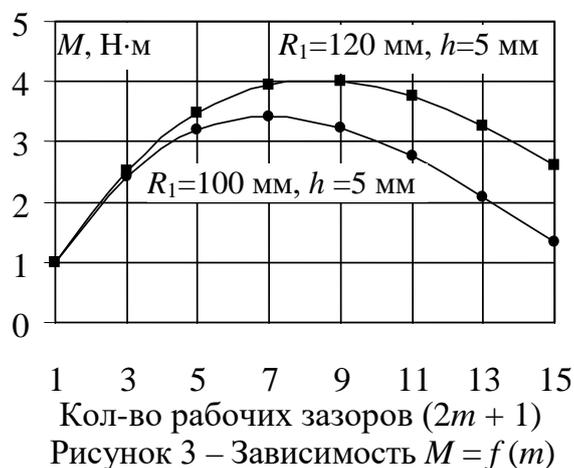


Рисунок 3 – Зависимость $M = f(m)$

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

Электромагнитная муфта. Электромагнитная муфта (см. рис. 4) 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 4, 5 показано на рисунке 4(б). Они имеют чередующиеся ферромагнитные и немагнитные сектора. Ферромагнитные сектора показаны штриховкой.

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. Самый правый диск 9 ведомого вала имеет плоскую правую поверхность, а слева выступы, аналогичной геометрии.

Передаваемый момент электромагнитной муфты равен

$$M = \frac{m \pi B_{\delta}^2 (R^2 - r^2) R_{\text{ср}}}{4k \mu_0}, \quad (4)$$

где R – наружный радиус; r – внутренний радиус ферромагнитного элемента; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус секторов дисков; m – количество рабочих зазоров; B_{δ} – магнитная индукция в рабочем зазоре; $k = \gamma R_{\text{ср}} / \delta = \pi (R + r) / 2n \delta = \text{const}$ – отношение средней длины дуги сектора диска к длине рабочего зазора; γ – угол одного сектора.

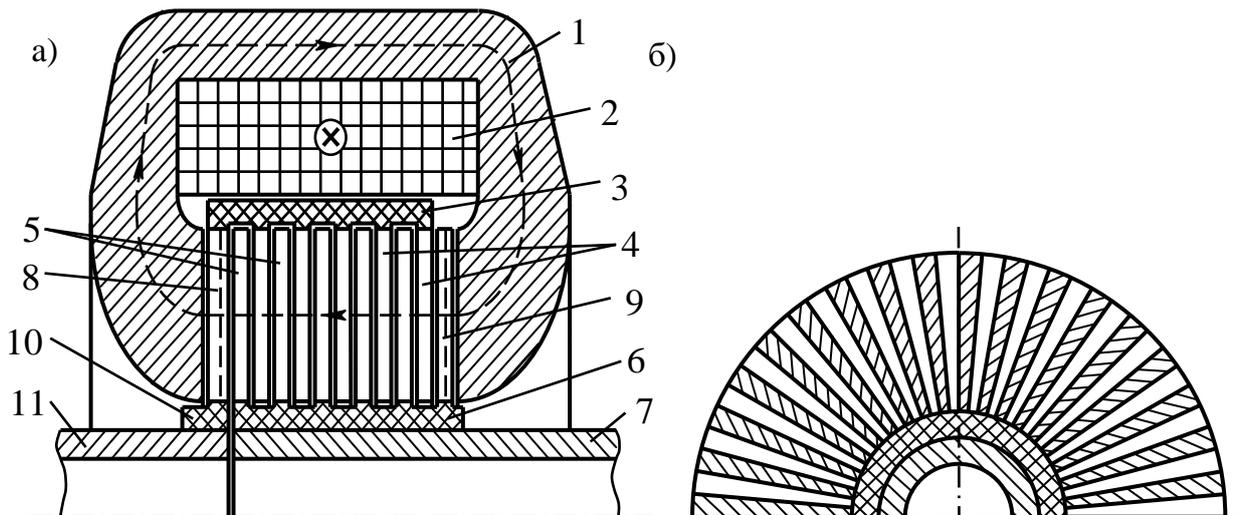


Рисунок 4 – Конструктивная схема электромагнитной муфты (а); сечение диска (б)

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.

Магнитный редуктор. Конструктивная схема многослойного магнитного редуктора показана на рисунке 5. 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.

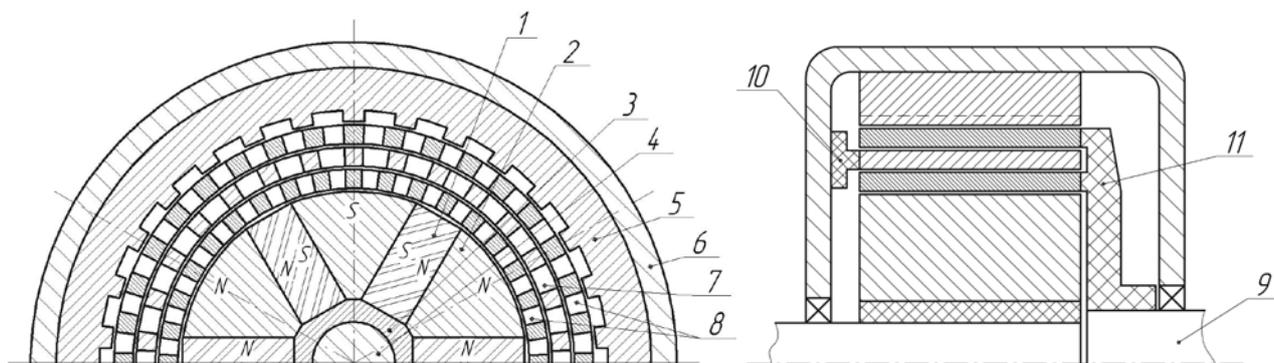


Рисунок 5 – Конструктивная схема магнитного редуктора

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 по-

лого цилиндра ротора медленного вращения и полого цилиндра статора отличается на единицу в пределах одного полюсного деления.

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) при холостом ходе. На рисунке 5 показан случай, когда передаточное отношение редуктора равно 8, т.е. ротор медленного вращения вращается со скоростью $\omega_2 = \omega_1/8$. Передаточное отношение редуктора равно $i = z_{р.м.в.} / (z_{р.м.в.} - z_c)$, где $z_{р.м.в.}$ – количество ферромагнитных элементов полого цилиндра ротора медленного вращения; z_c – количество ферромагнитных элементов полого цилиндра статора.

Крутящий момент на валу медленного вращения равен

$$M = (2m + 1)(R_0 - 2mh)^2 \frac{B_{\max}^2 z l}{\pi \mu_0 k_\delta}, \quad (5)$$

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 ($k_\delta = R / \delta$).

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. Недостатком данного редуктора является упругость передачи. При увеличении момента нагрузки на валу медленного вращения он отстает на некоторый угол от положения, соответствующего холостому ходу.

Магнитный редуктор не имеет механических контактов между подвижными частями, не требует наполнения маслом, он не изнашивается, бесшумен в работе, имеет большой срок службы, определяемый подшипниками, допускает ударные нагрузки, так как связь между валами осуществляется через магнитное поле, а введение полых цилиндров позволяет увеличить передаваемый момент при сохранении габаритов.

Электромагнит. На рисунке 6 показан электромагнит, который имеет магнитопровод

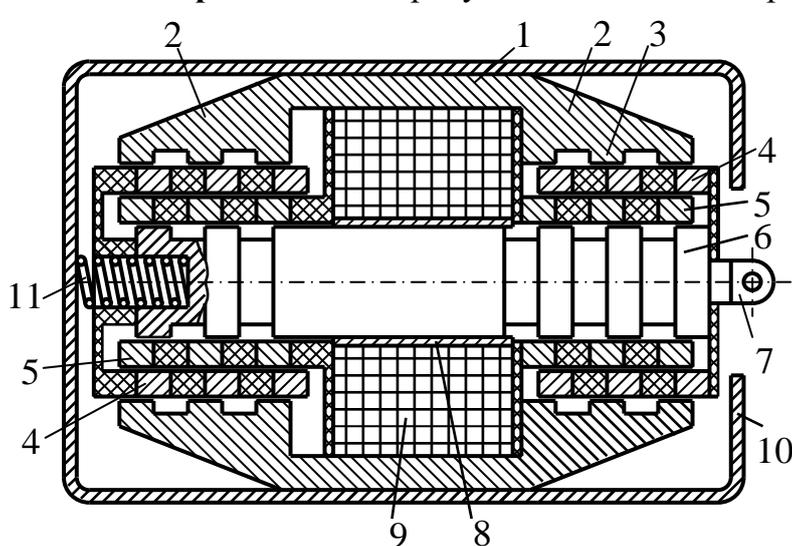


Рисунок 6 – Конструкция электромагнита с многослойным якорем

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. Полые цилиндры 4 представляют собой набор колец из ферромагнитного и немагнитного материалов, они механически связаны с якорем 6 и движутся вместе с ним.

Полые цилиндры 5 представляют собой набор колец из ферромагнитного и немагнитного материалов, они механически связаны с

магнитопроводом 1 и неподвижны. Якорь 6 имеет кольцевые выступы. Толщина полых цилиндров 4, 5 в два раза больше, чем высота выступов на магнитопроводе и на якоре. Ферромагнитные кольца показаны кривой штриховкой, а немагнитные заштрихованы как диэлектрик. Осевая ширина всех ферромагнитных колец и выступов одинаковая.

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 появляется электромагнитная сила, действующая влево на якорь 6 и на связанный с ним полый цилиндр 4. Эта сила действует через тягу 7 на исполнительный механизм.

Усилие, создаваемое взаимодействием одного выступа и одного кольца, и суммарное усилие равны

$$F_1 = BH\delta\pi d / 2; \quad F = mBIw\pi d / 2. \quad (6)$$

Здесь d – средний по зазору диаметр; δ – длина воздушного зазора; H – напряженность магнитного поля в зазоре; B – магнитная индукция в зазоре; 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.

В третьей 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.

В качестве примера расчета был выбран шаговый реактивный двигатель. Расчет основан на методике расчета классического ШД. Ниже изложенный подход может быть применен и к другим типам многослойных электрических машин и механизмов.

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

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \omega_H}{P'} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{o1} B_\delta A}, \quad (7)$$

где P' – расчетная мощность, ВА; α_δ – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; k_B – коэффициент формы кривой индукции; k_{o1} – обмоточный коэффициент для основной гармонической магнитного поля; B_δ – индукция в воздушном зазоре.

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 (7), определяют исходя из опыта проектирования. Удобно пользоваться величиной удельного момента $M_{уд}$ как отношением электромагнитного момента $M_{эм}$ к объему ротора V_R

$$M_{уд} = \frac{M_{эм}}{V_R} = \frac{M_{эм}}{(\pi/4)D_R^2 l_\delta}. \quad (8)$$

Электромагнитный момент ШД определяется его номинальными данными

$$M_{эм} = P_H / \Omega_H. \quad (9)$$

Удельный электромагнитный момент можно приблизительно определить по справочным данным (табл. 1), полученным при проектировании ШД для различных областей применения. 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 1 – Значения удельного $M_{уд}$ ШД для различных применений

| Исполнение и область применения | $M_{уд}$, кН·м/м ³ |
|---|--------------------------------|
| ШД малой мощности в закрытом исполнении | 1,96 ... 5,6 |
| Общепромышленные ШД мощностью 1...100 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. 1, легко определить объем ротора V_R и произведение

$$D_R^2 l_\delta = \frac{nM_{эм}}{V_R} = \frac{nM_{эм}}{(\pi/4)M_{уд}}. \quad (10)$$

После этого, задавшись значением отношения длины магнитопровода сердечника ротора l_δ к его диаметру D_R , которое, как правило, лежит в диапазоне $l_\delta = (0,5...2,0)D_R$, 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 $D = D_R + 2\delta$.

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

$$\delta = \begin{cases} 5 \cdot 10^{-3} \cdot D_R, & \text{если } l_\delta / D_R \leq 1 \\ (5 \div 10) \cdot 10^{-3} \cdot D_R, & \text{если } 1 < l_\delta / D_R \leq 2 \end{cases} \quad (11)$$

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

Дальнейшая процедура расчета аналогична классическому расчету. Однако при проектировании зубцово-пазовой зоны многослойной машины следует учесть следующие зависимости геометрических размеров.

Исходные данные к расчету геометрии зубцово-пазовой зоны – выбранная конфигурация магнитной системы статора: количество фаз m и количество полюсов статора N_{PS} .

Угловые размеры зубцов и пазов ротора и статора берутся равными, данные значения могут быть изменены в ходе численного моделирования магнитного поля ШД. Количество зубцов статора на полюс берется равным количеству рабочих зазоров, следовательно, количество зубцов статора на одном рабочем зазоре равно

$$N_S = nN_{PS} = n2pm. \quad (12)$$

Количество зубцов ротора на одном рабочем зазоре будет равно

$$N_R = N_S + 2p. \quad (13)$$

Таким образом, угловые размеры зубцов и пазов ротора будут равны

$$\alpha_{ZR} = \alpha_{PR} = 360^\circ / (2N_R). \quad (14)$$

Угловые размеры зубцов и пазов статора равны угловым размерам зубцов ротора

$$\alpha_{ZS} = \alpha_{PS} = \alpha_{ZS} = \alpha_{PS}. \quad (15)$$

Для сохранения подобия картины магнитного поля в зоне взаимодействия зубцов и ферромагнитных элементов вводятся два коэффициента: k_δ и k_h .

Отношение длины рабочего зазора и его радиуса

$$k_\delta = R_i / \delta_i, \quad k_\delta = \text{const}, \quad (16)$$

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

Отношение высоты ферромагнитного элемента и длины рабочего зазора

$$k_h = h_i / \delta_i, \quad k_h = \text{const}, \quad (17)$$

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

С учетом рассчитанной геометрии зубцово-пазовой зоны и выражения (3) крутящий момент будет равен сумме моментов на различных рабочих зазорах

$$M_i = z_p p \frac{B_i^2 R_i \delta_i L}{\mu_0}, \quad M = \sum_{i=1}^n M_i \quad (18)$$

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 (18) примет вид

$$M_i = z_p p \frac{\left(B_1 \frac{R_1}{R_i} \right)^2 R_i \delta_i L}{\mu_0}, \quad M = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (19)$$

где $B_i = B_1 R_1 / R_i$ – магнитная индукция на i -ом зазоре без учета насыщения.

Согласно данной методике был проведен расчет 4-х фазного ШД конфигурации 8/6 в классическом варианте со следующими исходными данными: $P_n = 4000$ Вт – номинальная мощность; $U_n = 400$ В – номинальное напряжение; $i_p = 3$ – коэффициент редукции ротора в классическом варианте; $n_n = 3000 / i_p = 1000$ об/мин – номинальная скорость вращения.

Для проведения расчетов с различным количеством рабочих зазоров и расчета геометрии зубцово-пазовой зоны была разработана программа в среде Mathcad 14. Были рассчитаны крутящие моменты для ШД с количеством рабочих зазоров от 1 до 5 с учетом насыщения и без учета. Рассчитанная геометрия магнитной системы приведена на рисунке 7 для вариантов с рабочими зазорами от 1 до 3.

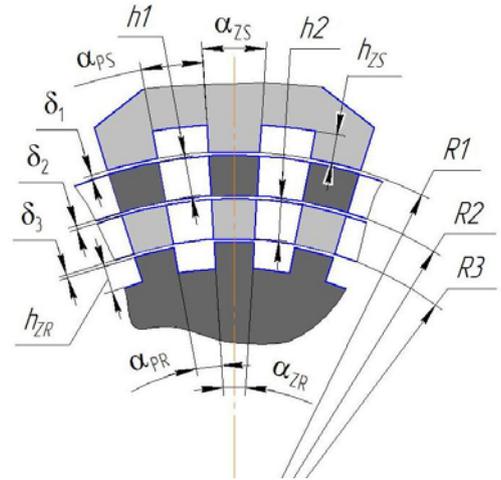


Рисунок 6 – Параметры многослойной рабочей зоны

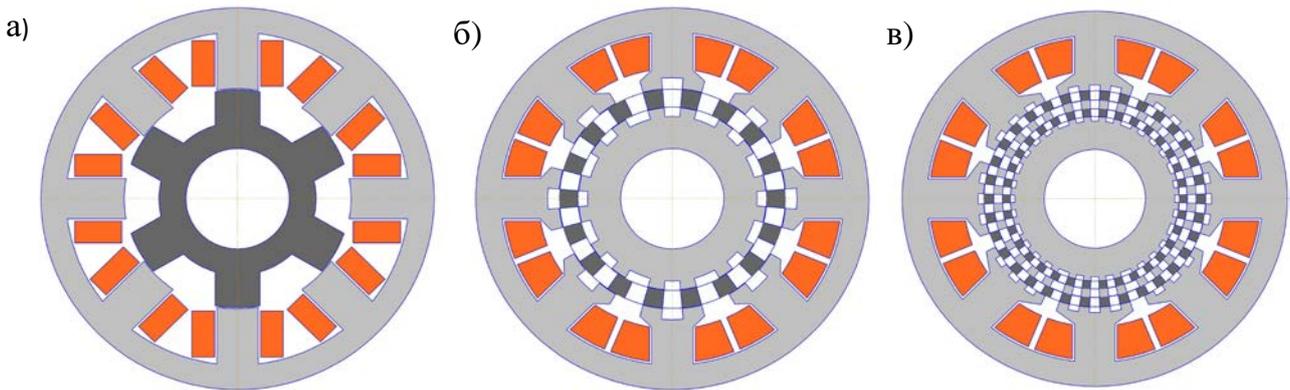


Рисунок 7 – Конструктивные схемы ШД: а) – с 1-им; б) – с 2-мя; в) – с 3-мя зазорами

Помимо численного расчета, было проведено моделирование данных ШД методом конечных элементов в программе AnsoftMaxwell 14.0. Параметры моделей: материал – Ст 2212 (с учетом кривой намагничивания); $I_w = B_\delta \delta_0 / \mu_0 = 1150 \text{ А}$; $l_\delta = 242,5 \text{ мм}$.

Результаты расчета для всех моделей, т.е. для ШД с рабочими зазорами от $n = 1$ до $n = 5$, приведены на рисунке 8(а).

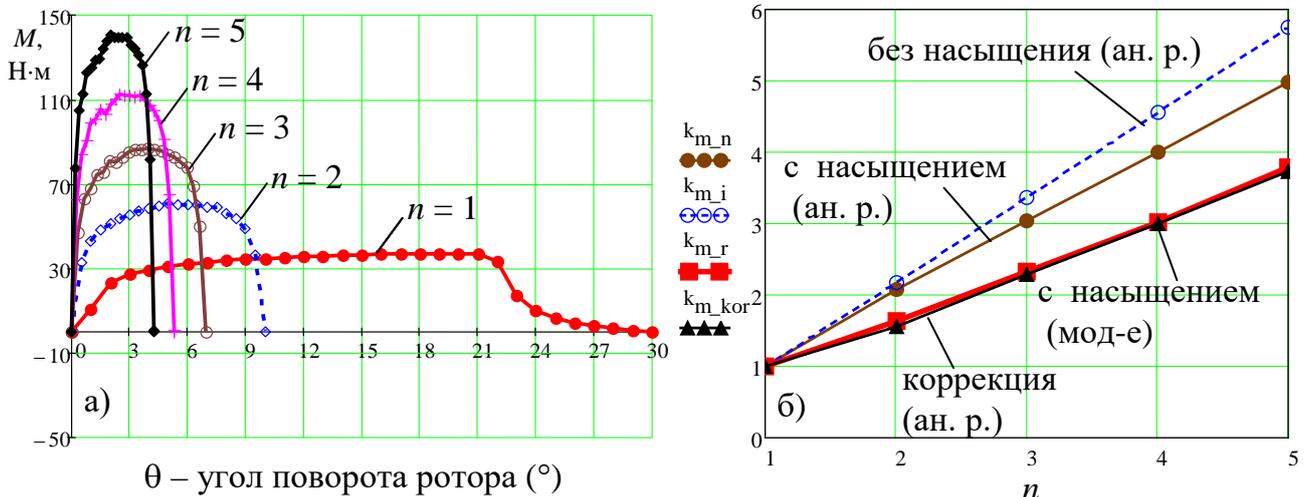


Рисунок 8 – а) результаты моделирования в Ansoft Maxwell; б) относительные крутящие моменты

На графике видно, что с увеличением количества рабочих зазоров увеличивается максимальное значение крутящего момента ротора.

Здесь $k_{m_{ij}} = M_i / M_{\text{кл}}$ – отношение момента ротора ШД без учета насыщения к моменту ШД с одним рабочим зазором (расчет, раздел 3.2); $k_{m_{ni}} = M_i^{\text{нас}} / M_{\text{кл}}$ – отношение момента ротора ШД с учетом насыщения к моменту ШД с 1-им рабочим зазором (аналитический расчет, раздел 3.2); $k_{m_{ri}} = M_i^{\text{чис}} / M_1^{\text{чис}}$ – отношение момента ротора ШД к моменту ШД с одним рабочим зазором (моделирование, раздел 3.4); $k_{m_{kor_i}} = 0,75k_{m_{ni}}$, $i = 2..n$ – коррекция результатов аналитического расчета к результатам моделирования.

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

$$M_{\text{эм1}} = 38,19 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad M_1^{\text{мод}} / M_{\text{эм1}} = 37,17 / 38,19 = 0,973.$$

Выбранная система моделирования с большой точностью обеспечивает расчет магнитных полей и полученные значения близки к аналитическим расчетам. Из последнего выражения видно, что параметры многослойных ШД могут быть рассчитаны с помощью методики, представленной в данной главе, и аппроксимированы с большой точностью.

В четвертой главе проводятся исследования влияния геометрии зубцово-пазовой зоны многослойного и классического электромагнитов.

Исследование влияния ширины ферромагнитных элементов на усилие электромагнита. Проведено исследование влияния ширины зубцов и ферромагнитных элементов статора и лайнера на усилие электромагнита. Моделирование проводилось в среде расчета магнитных полей методом конечных элементов AnsoftMaxwell 14.0.

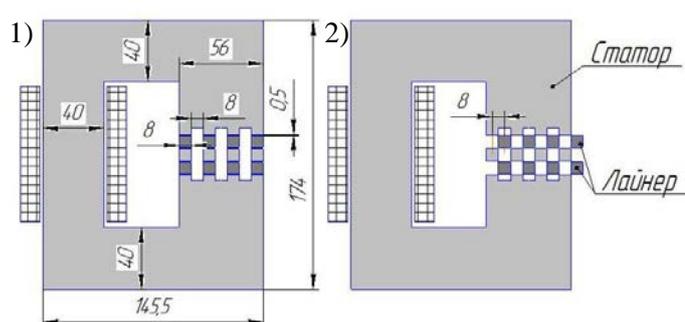


Рисунок 9 – Исходная модель расчета

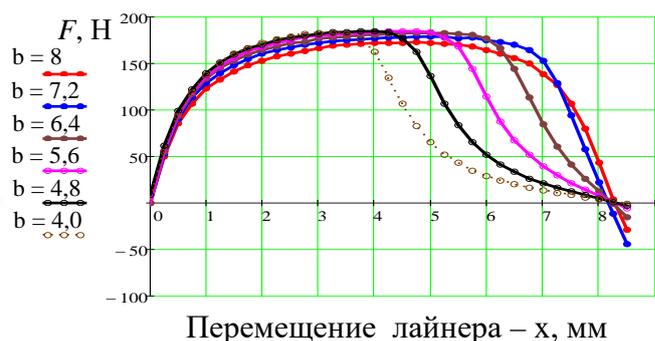


Рисунок 10 – Результаты моделирования

Целью исследования является нахождение ширины зубцов (ферромагнитных элементов) статора и лайнера, обеспечивающих максимальное усилие электромагнита. Были получены зависимости усилия электромагнита от перемещения лайнера при различной ширине зубцов и ферромагнитных элементов статора и лайнера.

На рисунке 9 показана исходная модель расчета. Другие модели имеют аналогичные размеры, за исключением ширины зубцов и ферромагнитных элементов статора и лайнера, которые уменьшались с 8-ми до 4-х мм с шагом 0,8 мм. Параметры модели: ферромагнитный материал – Ст 2212 (тонколистовая холоднокатаная изотропная сталь); МДС катушки $I_w = 2500$ А; активная длина электромагнита – $l = 30$ мм.

Результаты моделирования в виде графиков усилий от перемещения лайнера при разной ширине зубца статора и лайнера показаны на рисунке 10. Максимальное усилие соответствует варианту № 5 и равно $F_{5\max} = 184,92$ Н. Таким образом, максимальное увеличение усилия (на 6,9%) соответствует 5-ому варианту (ширина зубца – 4,2 мм), при этом перемещение лайнера возможно лишь на 4,2 – 4,3 мм.

Исследование влияния длины рабочего зазора на усилие электромагнита. Проведено исследование влияния длины рабочего зазора на усилие электромагнита. Моделирование проводилось в среде расчета методом конечных элементов AnsoftMaxwell 14.0.

Были получены зависимости усилия электромагнита от перемещения лайнера при различной длине рабочего зазора и сохранении остальных размеров.

На рисунке 11 показана модель расчета № 1 с длиной рабочего зазора 1 мм. На рисунке 11(1) показано начальное положение лайнера электромагнита, на рисунке 12(2) – конечное положение лайнера (смещение лайнера равно 16 мм). Исследуемые длины рабочих зазоров: 1 мм; 0,5 мм; 0,25 мм.

Параметры модели: ферромагнитный материал – Ст 3; МДС катушки равно 1800 А (соответствует МДС лабораторного электромагнита); активная длина – $l_\delta = 30$ мм.

Результаты моделирования в виде кривых усилий от перемещения лайнера при разной длине рабочего зазора показаны на рисунке 12. Максимальное значение усилия соответствует зазору №3 и равно $F_{3\max} = 138,98 \text{ Н}$.

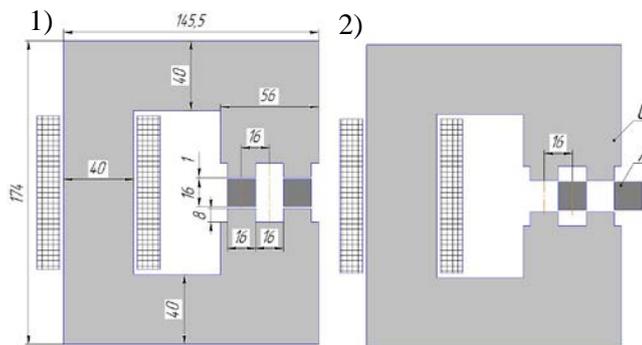


Рисунок 11 – Модель расчета

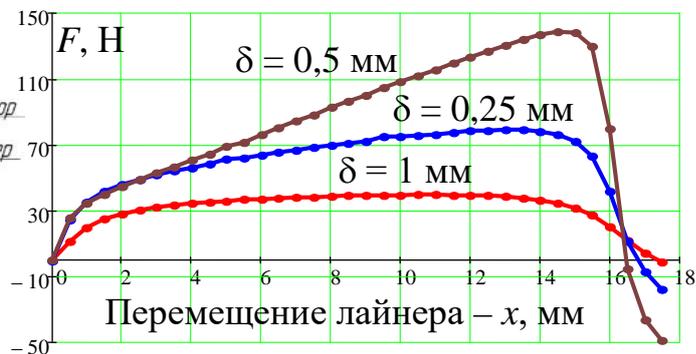


Рисунок 12 – Усилие $F(x)$ при различных длинах рабочих зазорах

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. Были получены зависимости усилия электромагнита от перемещения лайнера при различных количествах рабочих зазоров.

Был спроектирован и изготовлен электромагнит, имеющий соответствующие сменные полюса и лайнеры. На рисунке 13(б) показаны фотографии изготовленных электромагнитов. Классический вариант с 2-мя рабочими зазорами длиной в 1 мм показан на рисунке 13(б.1). Вариант с многослойным лайнером и с 4-мя рабочими зазорами длиной 0,25 мм показан на рисунке 13(б.2). Изменение конструкции рабочей зоны достигается за счет съемных полюсов. Вертикальное передвижения лайнера ограничивается капролоновыми пластинами, они же служат поверхностью скольжения.

Схема лабораторной установки показана на рисунке 13(а). 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.

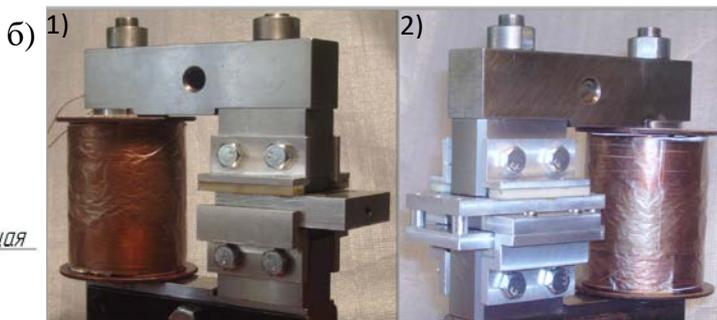
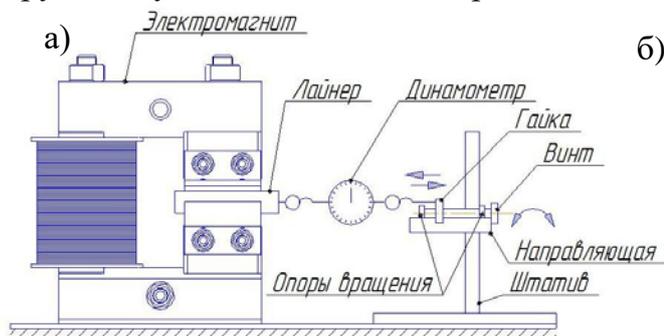


Рисунок 13 – Схема лабораторной установки (а); электромагнит классический и с многослойным лайнером (б)

Параметры эксперимента: напряжение питания катушки – 24 В; МДС обмотки – 1800 А; материал магнитопровода – Ст3; нагрузочное (измерительное) устройство – динамометр ДПУ-0.2-2 (класс точности 2).

На рисунке 14(а) показаны кривые усилия электромагнита при моделировании и кривые 1 и 2 усилий электромагнита лабораторного. Видно, что усилие прямо пропорционально количеству рабочих зазоров, а перемещение уменьшается, что соответствует правилу рычага. Полученные результаты показывают хорошее совпадение экспериментальных данных и численного моделирования. Погрешность моделирования обусловлена наличием трения в лабораторном электромагните.

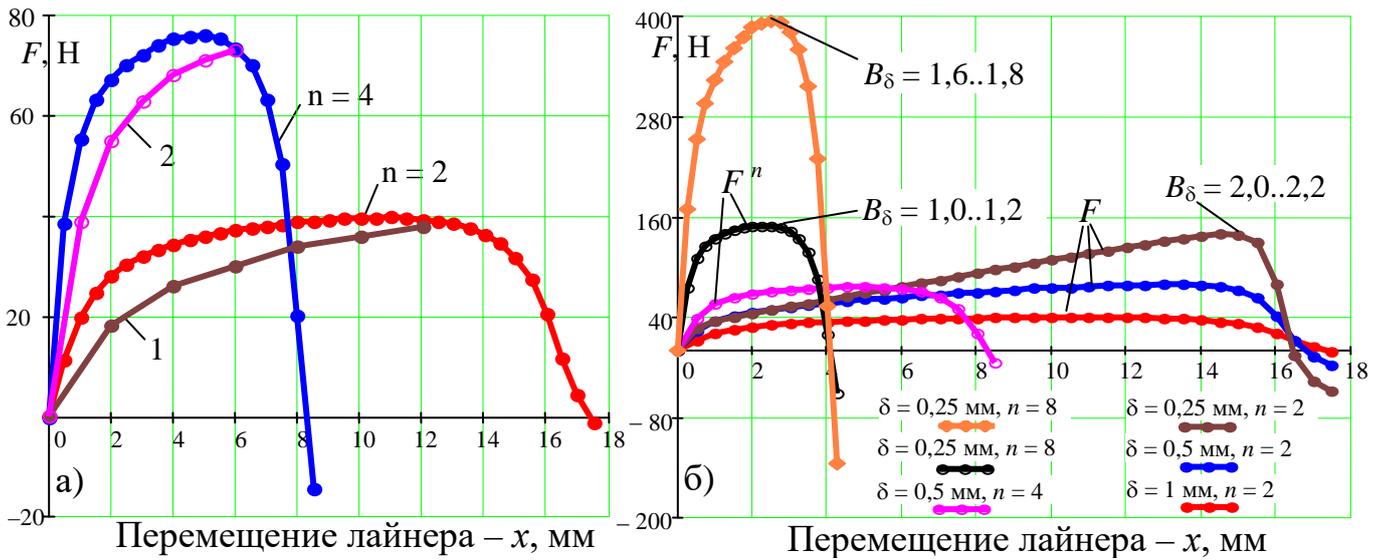


Рисунок 14 – а) сравнение усилий моделирования и лабораторных экспериментов; б) результаты моделирования $F(x)$ при различных длинах рабочих зазоров (δ) и при различных их количествах (n)

Сравнение результатов численного моделирования и лабораторных данных. Результаты моделирования в виде кривых усилий от перемещения лайнера при разной длине рабочего зазора и при разных их количествах показаны на рисунке 14(б).

Максимальное усилие для начального варианта равно $F_{1\max} = 39,718$ Н.

Максимальные усилия для вышеприведенных кривых при $Iw = 1800$ А

$$F_{\max}^{\text{кл}} = \begin{pmatrix} 79,43 \\ 138,98 \end{pmatrix} \text{Н}, \quad F_{\max}^n = \begin{pmatrix} 75,94 \\ 149,15 \end{pmatrix} \text{Н},$$

где $F_{\max}^{\text{кл}}$ – усилие для классического варианта электромагнита с 2-мя рабочими зазорами;

F_{\max}^n – усилие для многослойных вариантов.

Коэффициент $k_F^{\text{кл}}$ 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

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

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 проведенные численные исследования и картины магнитных полей показали, 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 МДС. На рисунке 14(б) показан график (оранжевый цвет) усилия многослойного варианта при увеличенном значении МДС 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 отличие от классического варианта, где индукция достигает значений более 2,0 Тл и практически в 1/3 зубца, т.е. зубцы переходят в режим насыщения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Приведены основные положения построения конструкций электрических машин и электромагнитных устройств с многослойными решетчатыми 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 многослойных магнитопроводов ротора и статора. Получены 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 съёмными 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 количеству 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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России

1. Давыдов, Н. В. Численное моделирование электромагнитных мультипликаторов / Н. В. Давыдов // Инновации и инвестиции. — 2015. — № 3. — С. 178 –180.

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

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

Публикации в других научных изданиях

4. Давыдов, Н. В. Шаговый двигатель с многослойным ротором / Н. В. Давыдов // III 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.

5. 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. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – Т. II. – С. 109 – 110.

6. Давыдов, Н. В. Электрические машины с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями / Н. В. Давыдов // XV Туполевские чтения: Международная молодёжная научная конференция, 9-10 ноября 2007 года: материалы конференции. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2007. – Т. II. – С. 249 –251.

7. Давыдов, Н. В. Об электрических машинах с высокими массогабаритными показателями / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов // Сб. 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. – Казань: Отечество, 2007. – Ч. 1. – С. 61 – 63.

8. 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. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – Том II. – С. 333 – 335.

9. Давыдов, Н. В. 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, струй-

ная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: в 2 ч. – Казань: Отечество, 2008. – Ч. 1. – С. 95 – 97.

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

11. Давыдов, Н. 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 / ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа». – Казань: Изд-во «Слово», 2011. – Т. II. – С. 187 – 192.

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

Патенты на изобретения и полезную модель

13. Пат. 2321140 РФ, МПК H02K 19/06, 19/00. Синхронный электродвигатель / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патеновладелец КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2006142111/09; заявл. 02.11.2006; опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9.

14. Пат. 2321144 РФ, МПК H02K 37/02. Шаговый электродвигатель / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2006142110/09, заявл. 02.11.2006; опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9.

15. Пат. 2356155 РФ, МПК H02K 19/06, 16/00, 21/12. Синхронный электродвигатель / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008114250/09, заявл. 11.04.2008; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14.

16. Пат. 2366018 РФ, МПК H01F 7/13. Электромагнит / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008114232/09, заявл. 11.04.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24.

17. Пат. 2366066 РФ, МПК H02K 41/03. Линейный шаговый электродвигатель / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов, В. Т. Герасименко; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008114251/09, заявл. 11.04.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24.

18. Пат. 2369954 РФ, МПК H02K 49/06, F16D 27/115. Электромагнитная муфта / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008114249/09, заявл. 11.04.2008; опубл. 10.10.2009, Бюл. № 28.

19. Пат. 2369955 РФ, МПК H02K 51/00, F16H 1/06. Магнитный редуктор / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008114250/09, заявл. 11.04.2008; опубл. 10.10.2009, Бюл. № 28.

20. Пат. 2375806 РФ, МПК H02K 19/06, 19/10, 16/00. Синхронный электродвигатель с магнитной редукцией / А. Ю. Афанасьев, Н. В. Давыдов; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008139836/09, заявл. 07.10.2008; опубл. 10.12.2009; Бюл. № 34.

21. Пат. на полезную модель 118136, МПК H02K 51. Магнитный редуктор-мультипликатор / Н. В. Давыдов; заявитель и патентообладатель Давыдов Н.В. – 2012103578/07, заявл. 02.02.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ Б60

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К. Маркса, 10