Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

На правах рукописи

НГУЕН КОНГ ТАМ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСПАЗОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Афанасьев Александр Александрович

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1. БЕСПАЗОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ:
КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ11
1.1 Беспазовые машины постоянного тока11
1.2 Постоянные магниты из редкоземельных элементов для беспазовых
вентильных электродвигателей14
1.3 Беспазовые вентильные двигатели с постоянными магнитами с
медными проводниками обмотки статора15
1.4 Беспазовые магнитоэлектрические вентильные двигатели с медно-
железными проводниками обмотки статора
1.5 Выводы по главе 1
ГЛАВА 2.ОСНОВЫ ТЕОРИИ БВДМ С МЕДНЫМ ПРОВОДОМ В ПОЛЕВОЙ
АНАЛИТИЧЕСКОЙ ФОРМЕ25
2.1 Аналитическая модель магнитного поля в активной зоне беспазового
магнитоэлектрического вентильного двигателя
2.2 Аналитическая модель магнитного поля в ярмовых участках
беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя
2.2.1 Магнитное поле в ярме статора
2.2.2 Магнитное поле в ярме ротора
2.3 ЭДС обмотки статора и момент беспазового магнитоэлектрического
вентильного двигателя
2.4 Влияние высоты магнитов на рабочие свойства беспазового
магнитоэлектрического вентильного двигателя

2.5 Сравнительный анализ КПД и электромагнитных потерь пазового и
беспазового магнитоэлектрических вентильных двигателей
2.6 Выводы по главе 2
ГЛАВА 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ БЕСПАЗОВОГО
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С
КОМБИНИРОВАННЫМ ПРОВОДОМ
3.1 Комбинированный провод 68
3.2 Аналитическая модель магнитного поля в активной зоне БВДМ с
комбинированным проводом70
3.3 Аналитическая модель магнитного поля в ярмовых участках БВДМ
с комбинированным проводом76
3.3.1 Магнитное поле в ярме статора76
3.3.2 Магнитное поле в ярме ротора
3.4 ЭДС обмотки статора и момент БВДМ с комбинированным
проводом
3.5 Влияние высоты магнитов на рабочие свойства БВДМ с
комбинированным проводом91
3.6 Электромагнитные потери и КПД беспазового магнитоэлектрического
вентильного двигателя с комбинированным проводом
3.7 Выводы по главе 3
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТНЫХ
ОБРАЗЦОВ БВДМ С МЕДНЫМ ПРОВОДОМ
4.1 Первое экспериментальное исследование
4.2 Второе экспериментальное исследование
4.3 Выводы по главе 4 105

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ111
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Сборочный чертёж БВДМ118
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Габаритный чертёж БВДМ 119
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Сборочный чертёж статора БВДМ 120
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Сборочный чертёж ротора БВДМ121
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Лист ротора БВДМ 122
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Приборы и оборудование 123
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Группа катушечная обмотки статора БВДМ 124
ПРИЛОЖЕНИЕ З. Материал об использовании и практической полезности
результатов диссертационного исследования127

введение

Актуальность темы исследования. В настоящее время пазовые магнитоэлектрические вентильные двигатели (ПВДМ) находят широкое применение в различных областях промышленности, энергетики, транспорта, в бытовых устройствах. Среди прочих можно отметить авиационную технику, автомобильное машиностроение, биомедицинскую аппаратуру, бытовую технику.

Расположение обмотки статора в пазах обеспечивает высокий уровень магнитной индукции в воздушном зазоре между статором и ротором, следовательно, большое значение электромагнитного момента в заданных габаритах активных материалов. По этому показателю магнитоэлектрические двигатели превосходят все другие типы электродвигателей [31]. Однако такое расположение проводников обмотки статора приводит и к отрицательным последствиям:

- повышенным магнитным потерям в стали зубцов статора.
- образованию реактивного момента, обусловленного неравномерностью воздушного зазора.

- появлению вихревых токов в массиве магнитов.

Первый нежелательный фактор вызывает нагрев статорного сердечника, поэтому допустимый уровень тока статора снижается по условиям нагревостойкости изоляции проводников обмотки.

Второй фактор влечёт неравномерность вращения ротора, особенно на низких скоростях, шум электродвигателя и повышенную вибрацию.

Третий нежелательный фактор, связанный с нагревом магнитов, приводит к их размагничиванию, следовательно, перегрузочная способность двигателя будет уменьшаться.

У вентильных двигателей с беспазовым исполнением обмотки статора (БВДМ) эти недостатки отсутствуют. Следует отметить, что при удалении зубцов, диаметр ротора возрастёт, что вызовет, при прочих равных условиях, увеличение электромагнитного момента. При отсутствии зубцов статора с повышенными магнитными потерями возможно увеличение номинального тока двигателя.

В технической литературе исследования беспазового вентильного электродвигателя на базе полевой модели практически отсутствуют. Таким образом, решаемая в диссертации научно-техническая задача создания полевой аналитической модели для беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя является актуальной и востребованной.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад В решение общих проблем повышения энергоэффективности, разработку методов оптимизации конструкции, создание теоретических И практических основ для исследования, разработки и совершенствования беспазовых двигателей с постоянными магнитами для различных областей применения внесли российские и зарубежные ученые: А.А. Афанасьев, B.A. И.А. B.A. Балагуров, Нестерин, Вевюрко, A.A. Дубенский, А.И. Скороспешкин, Л.Я. Зиннер, Н.И. Лебедев, Ю.П. Коськин, В.К. Лозенко, А.Г. Микеров, И.Е. Овчинников, Б. Цаубитцер, Х. Моцала – Германия, Н. Брейлсфорд, В. Хайсерман (США), Каварадо Матасаро (Япония), ученые и инженеры.

Объектом исследования является беспазовый вентильный двигатель, состоящий из синхронной электрической машины с постоянными магнитами на роторе и трехфазной обмотки статора.

Предметом исследования являются магнитное поле, электромагнитные процессы, рабочие и механические характеристики БВДМ.

Цель диссертационной работы – разработка и исследование беспазового вентильного электродвигателя с постоянными магнитами с

6

улучшенными энергетическими, эксплуатационными характеристиками на основе средств и методов аналитического моделирования.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1. Создание аналитической полевой модели магнитного поля в немагнитном зазоре между статором и ротором, ярмовых участках БВДМ с применением медных обмоточных проводов статора.

2. Анализ на базе полевой модели магнитного поля в немагнитном зазоре между статором и ротором, в ярмовых участках с применением комбинированных обмоточных проводов статора, имеющих кроме медной основы ферромагнитную оболочку.

3. Исследование влияния высоты магнитов на рабочие свойства беспазового магнитоэлектрического двигателя с медным и комбинированным проводом.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных теоретические исследования задач применились с использованием аналитического полевого подхода на основе периодических комплексных потенциальных функций, моделирования на основе тригонометрических уравнений. В частности, полевая задача решалась в программе Mathcad 15. Экспериментальные исследования проводились чебоксарском на электроаппаратном заводе (ЧЭАЗ), результаты получены с помощью цифрового измерителя-регистратора.

В результате выполненной работы были получены следующие новые научные результаты:

1. Создана полевая аналитическая модель беспазового электродвигателя с постоянными магнитами на роторе, позволяющая рассчитать магнитное поле, электромагнитный момент, ЭДС обмотки статора и рабочие характеристики электродвигателя.

2. На основе созданной полевой аналитической модели проведены исследования влияния высоты магнитов на рабочие свойства БВДМ и обоснован её выбор для требуемых применений БВДМ.

3. Электромагнитный момент БВДМ с комбинированной обмоткой при прочих равных условиях будет не меньше электромагнитного момента аналогичного двигателя с зубчатым статором. В рассмотренном примере это превышение составит 1,28 раза.

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

Практическая и теоретическая значимость работы.

1. Создание в результате выполнения диссертационной работы математических моделей и методики, подтвержденных экспериментальными исследованиями, которые составляют методическую базу для разработки и исследования беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя.

2. Рекомендации по применению комбинированных проводов в качестве обмоточных проводов обмотки статора, имеющих железную оболочку и медную основу, позволяющих увеличить электромагнитный момент беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя.

3. Проведен анализ влияния высоты магнитов на рабочие свойства БВДМ с медными проводами и комбинированными проводами и даны рекомендации по её выбору.

4. Результаты работы используются в беспазовых магнитоэлектрических вентильных двигателях предприятия ЧЭАЗ.

5. Результаты диссертационной работы применяются в учебном процессе по дисциплине «Электрические машины».

8

Личный вклад автора. Выполнение всех представленных в работе расчётов, составление аналитических моделей и разработка методики непосредственное участие проектирования, также В проведении a экспериментальных исследований, разработке конструкции беспазового экспериментального образца магнитоэлектрического вентильного двигателя на предприятии ЧЭАЗ.

Апробация работы: Основные положения и результаты исследования были доложены и обсуждены на следующих конференциях:

— XII Всероссийская научно-техническая конференция, 5 июня 2017
 г., город Чебоксары;

Конференция молодых учёных и специалистов, 24 октября 2017 г., город Чебоксары;

– I Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности»,
 16 – 17 ноября 2017 г., город Чебоксары;

– XI Всероссийская научно-техническая конференция ИТЭЭ, 7-9 июня 2018 г., город Чебоксары.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ: из них 4 статьи из перечня ВАК, 4 статьи в других печатных изданиях.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 68 наименований и 8 приложений. Общий объём работы составляет 127 страницы машинописного текста. В диссертации содержится 53 рисунка и 21 таблица.

Положения, выносимые на защиту:

1. Полевая аналитическая модель магнитного поля, позволяющая рассчитать магнитное поле в немагнитном зазоре и ярмовых участках,

электромагнитный момент, электродвижущую силу в обмотке статора БВДМ.

2. Влияние обмотки якоря из комбинированных проводов и высоты постоянных магнитов на рабочие свойства БВДМ.

3. Результаты комплексных исследований БВДМ с медными и комбинированными проводами и данные эксперимента.

ГЛАВА 1. БЕСПАЗОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ: КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1 Беспазовые машины постоянного тока

В настоящее время потребность в коллекторных электродвигателях постоянного тока, используемых в различных системах электроприводов, требующих плавного регулирования частоты вращения в широких пределах, высокой перегрузочной способности по моменту, не снижается. Попрежнему обширной областью их применения остается тяговый электропривод транспортных средств, станкостроение в качестве гребных двигателей для маневренных судов.

Анализ показателей этих электродвигателей свидетельствует о том, что в коммутационном отношении они являются весьма напряженными и дальнейшее повышение мощности сдерживается именно этим фактором.

Известная с начальных этапов развития электромашиностроения конструкция машины постоянного тока (МПТ) с беспазовым якорем после материалов (пластмасс, создания новых изоляционных эпоксидных компаундов, бандажной стеклоленты и др.), в 60-х и 70-х годах в СССР получила новое развитие. В этот период наиболее интенсивно проводились работы по созданию беспазовых машин постоянного тока ЛЛЯ электрифицированных транспортных средств различного назначения. В обычных электродвигателях постоянного тока наиболее ответственным их элементом является зубцовая зона якоря. Отличительной особенностью двигателя с беспазовым якорем является отсутствие в его магнитной цепи зубцовой зоны. При этом обмотка якоря равномерно укладывается на предварительную изолированную цилиндрическую поверхность сердечника. Упразднение зубцового слоя якоря приводит к увеличению немагнитного слоя в БМПТ и к уменьшению полезного магнитного потока. Для сохранения

его на уровне магнитного потока двигателя с зубчатым якорем необходимо соответственно увеличивать магнитодвижущую силу (MДC) обмотки возбуждения путем увеличения числа витков катушки главного полюса. Благодаря большим немагнитному слою (воздушному зазору) и МДС на зазор БМПТ являются слабо насыщенными машинами и обладают мягкими электромеханическими И механическими характеристиками, которым свойственны существенные преимущества в части использования мощности в зоне высоких скоростей и саморегулирования. Такие двигатели обладают большими коэффициентами магнитной устойчивости значительно И эксплуатационной перегрузки, чем двигатель постоянного тока с зубчатыми якорями.

Коллекторные двигатели постоянного тока в беспазовом исполнении позволяют в 2–3 раза снизить реактивную электродвижущую силу и так же улучшить коммутацию тока коллектором [11].

В номерах 1 – 4 таблицы 1 представлены основные данные беспазовых МПТ, на которых разработали и выявили проблемы, сдерживающие и по настоящее время более широкое применение беспазовых МПТ, а именно повышенные добавочные потери обмотки В проводниках якоря, обусловленные отсутствием экранирующего действия зубцов, повышенный расход меди на обмотки возбуждения вследствие значительного увеличения зазора, трудности надежного закрепления проводников немагнитного обмотки якоря на вращающейся цилиндрической поверхности сердечника. Большой вклад в решение этих проблем внесли отечественные ученые В.Е. Скобелев и В.П. Толкунов со своим учениками. Значительная работа по созданию тяговых беспазовых электродвигателей постоянного тока была выполнена под руководством В.И. Бочарова [11].

12

			Номинальные данные			
Номер пункта	Марка машины	Назначение	Мощность, кВт	Напряже- ние, В	Частота вращения, мин ⁻¹	
1	НБ-504	Тяговый двигатель для электровоза	790	950	865	
2	PT-64-1	Тяговый двигатель для электропоездов	200	825	1170	
3	PT-116	Тяговый двигатель для электропоездов	220	750	1130	
4	МПТГ99/47	Тепловозный генератор	1200	550	850	
5	ДК-212	Тяговый двигатель для троллейбуса	140	550	1850	
6	_	Тяговый двигатель для тепловоза	412	563	800	
7	ПГ-9М- УХЛ4	_	9	220	3000	
8	ДПГ-4000	Нереверсивный БЭПТ	300/100	400/200	4000	

Таблица 1 – Основные данные изготовленных беспазовых МПТ

Проблемы на добавочные потери в проводниках обмотки якоря и конструкции обмоточных проводов, обеспечивающих существенное их уменьшение, экспериментально установленных предельных величин, передаваемых в немагнитном зазоре, были решены. Однако существенного распространения беспазовых электродвигателей постоянного тока (БЭПТ) средней и большой мощности не получили, и их применение ограничивается в настоящее время сравнительно небольшим диапазоном мощностей до 10 кВт (п.7 таблицы 1) в качестве исполнительных электродвигателей автоматических систем различного назначения. Применение однослойных

многоходовых петлевых обмоток якоря с увеличением числа ходов m обмотки якоря БМПТ позволяет спроектировать ее с меньшим диаметром якоря, а значит меньших радиальных размеров и пониженными моментом инерции, повысить число параллельных ветвей обмотки якоря 2a = 2mp и соответственно уменьшить ток параллельной ветви обмотки якоря i_a , число пар полюсов, размеры проводников обмотки якоря и таким об разом понизить добавочные потери в них. Однако по сравнению с двухслойными обмотками, получившими широкое распространение для зубчатых якорей, в БМПТ обмотку якоря с целью уменьшения немагнитного зазора между полюсами и якорем целесообразно выполнять однослойной [30].

1.2 Постоянные магниты из редкоземельных элементов для беспазовых вентильных электродвигателей

Постоянные магниты из редкоземельных металлов Nd-Fe-B к наиболее перспективным для применения в вентильных электродвигателях. По сравнению с другими типами магнитов постоянные магниты Nd-Fe-B обладают высокими преимуществами:

- магниты Nd-Fe-В значительно превосходят по энергетическому произведению.
- у магнитов Nd-Fe-В высокая температура Кюри, составляющая 160
 170°С для магнитов с рабочей температурой 80°С (в настоящее время выпустили магниты Nd-Fe-В с рабочей температурой до 200°С).

Постоянные магниты из редкоземельных элементов можно считать как наилучший вариант для применения в качестве индуктора на роторах вентильных электродвигателей. Такие магниты имеют высокую коэрцитивную силу, которую позволяет снижать размагничивание ротора во время работы. Высокая намагниченность обеспечивает высокий механический момент ВД. Кроме того, постоянные магниты Nd-Fe-B имеют малый удельный вес на единицу намагниченности, что с прочими равными условиями значительно снижает момент инерции ротора и увеличивает мощность двигателя.

Современные высокоэнергетические постоянные магниты из неодима, железа и бора имеют магнитную проницаемость, близкую к магнитной проницаемости воздуха. Для постоянных магнитов Ne-Fe-B, которых обладают $B_r = 1,15$ Тл и $H_{CB} = 915$ кA/м, их относительная магнитная проницаемость представлена следующим образом:

$$\mu'_{\rm M} = \frac{B_r}{\mu_0 H_{CB}} = \frac{1.15}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.915 \cdot 10^6} = 1,00015$$

Поэтому расчет магнитного поля в активной зоне электрической машины с такими магнитами можно считать пространство, в котором занимающие магниты, воздушной средой.

Будем полагать в дальнейшем, что рабочая точка возврата кривой магнита находится во втором квадранте, и в этом квадранте кривая является линейной.

Амперовы токи в теле постоянных магнитов Ne-Fe-B друг друга компенсируют и вызывают появление поверхностных токов [55, 61]. В идеальном случае эти токи протекают в бесконечно тонком поверхностном слое постоянных магнитов.

1.3 Беспазовые вентильные двигатели с постоянными магнитами с медными проводниками обмотки статора

До того, как появились высококоэрцитивные магниты из редкоземельных элементов Nd-Fe-B, в системах автоматики беспазовые статоры использовались в маломощных электродвигателях постоянного тока с полым ротором, где их применение не требовало большая электромеханическая постоянная времени.

Анализ особенностей характеристик высококоэрцитивных магнитов (высокие значения коэрцитивных сил по намагниченности и индукции, значение магнитной проницаемости, близкое к значению магнитной проницаемости воздуха) и сегодняшних требований к электрическим машинам показал, что беспазовые двигатели с высококоэрцитивными магнитами на роторе удается получить самые лучшие массогабаритные показатели и соответствующие другие выходные параметры.

В беспазовых магнитоэлектрических вентильных двигателях, наружный диаметр и структура ротора которых подобны, проектируют как ротор пазовых магнитоэлектрических вентильных двигателей. Статор устроится из заднего ярма статора ПВДМ, на статоре нет зубцов. Таким образом, на местах зубцов статора ПВДМ можно заменить обмотку статора. Её длина будет увеличиваться, вследствие этого потери в меди увеличивается из-за тока. Статор не имеет зубцов, поэтому можно ожидать, потери железа значительно уменьшатся, так как зубцы статора являются основным источником потерь железа во время ПВДМ работы на высокой скорости.

Трехфазные двухслойные обмотки находят широкое применение в пазовых электрических машинах и имеют следующие преимущества: размеры и формы катушек и групп одинаковы, возможность выполнения с любым шагом, простая форма всех частей. В результате этого, трехфазные двухслойные обмотки могут применяться в беспазовых статорах магнитоэлектрических вентильных двигателей [6].

В городе Чебоксары, на заводе ЧЭАЗ, выпускаются в пазовом исполнении магнитоэлектрические вентильные двигатели (ПВДМ) серии 6 и 5ДВМ, которые имеют диаметр присоединительных фланцевых отверстий 300, 215, 165, 115 и 85 и длительные моменты от 0,23 до 70 Н·м.

На ЧЭАЗ изготовили макетный образец беспазового вентильного двигателя с диаметром присоединительных фланцевых отверстий 115 мм (рисунки 1 и 2), специально для серийного ВД 6 и 5ДВМ, которого имеет активную длину 140 мм, максимальную частоту вращения $n_{\text{max}} = 6000$ об/мин длительный момент $M_{d0} = 7$ Н·м.

Опытный двигатель имеет следующие технические данные: максимальная скорость вращения $n_{max} = 6000$ об/мин; m = 3; число пар полюсов p = 3; число виртуальных пазов на полюс q = 2; материал магнита – неодим-железо-бор с $B_r = 1,15$ Тл; коэрцитивная сила $H_{CB} = 915$ кА/м; воздушный зазор равен 1,5 мм; вал – из стали 3; сердечник ротора и статора выполнены со сталью 2013; радиальная толщина двухслойной обмотки равна 6,25 мм; расчетная длина $l_6 = 0,14$ м; число виртуальных пазов z = 36; диаметр расточки статора $D_i = 75,5$ мм; немагнитный зазор $\delta = 12,05$ мм (состоит из обмоточного слоя толщиной 6,25 мм, магнитов толщиной 4,3 мм, воздушного зазора размером 1,5 мм); частота тока f = 50 Гц; число витков в катушке $w_k = 8$; шаг обмотки $y = 5/6\tau$; число витков в фазе w = 96; диаметр обмоточного провода 0,6 мм; $I_H = 4,4$ А.



Рисунок 1 – Корпус и статор беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя: 1 – разъем 2PM24; 2 – разъем ШР20; 3, 4, 5, 6 – отверстия; 7 – беспазовые обмотки статора





Рисунок 2 – Ротор беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя: 1 – вал ротора; 2 – постоянные магниты; 3 – ярма ротора;

Результаты исследования рассматриваемого БВДМ показывают, что в воздушном зазоре между статором и ротором максимальное значение индукции примерно равно 0,5 Тл. В ярмах участках статора и ротора индукции соответственно равны 0,37 и 1,24 Тл, по этому показателю можно в 3,7 раза уменьшить сечение ярма статора (в этом участке индукция повышается до 1,37 Тл), из-за этого можно увеличить электромагнитный момент за счет увеличения наружного диаметра ротора (при сохранении наружного диаметра ярма статора) и экономить материал.

Тепловые испытания рассматриваемого БВДМ показали, что обмотка его статора с классом нагревостойкости F при номинальном токе I = 4,4 А температуры обмотки превысит температуру окружающей среды, с помощью измеренного метода сопротивления, составило 100 °C.

При указанном токе двигатель имеет опытное максимальное значение момента 3,6 Н·м.

Как выше отмечено, выпускающий серийный ПДВМ имеет диаметр присоединительных фланцевых отверстий 115 мм и длительный момент на валу $M_{d0} = 7$ Н·м (согласно стандарту такой момент должен выдерживаться в интервале скоростей $(0-0,25)n_{max}$; на последующих интервалах $(0,25-0,5)n_{max}$ и $(0,5-1)n_{max}$ момент должен быть не более $0,8 M_{d0}$ и $0,5 M_{d0}$ соответственно). Тепловые испытания серийного вентильного двигателя показали, что в конце трех указанных интервалов моменты двигателя не превышают значений $(0,54; 0,33; 0) M_{d0}$ соответственно.

В [50] приведены аналогичные испытания опытного макета БВДМ. При его длительном моменте $M_{d0} = 3,6$ Н·м получили значения момента на валу двигателя (0,86; 0,71; 0,43) M_{d0} . Из экспериментальных результатов можно подтверждать, что при частоте вращения выше 2800 об/мин длительный момент на валу беспазового вентильного двигателя может развивать больше, чем момент аналогичного вентильного двигателя в пазовом исполнении.

Экспериментальные результаты испытания вентильного двигателя представлены в таблице 2.

	БВДМ		ПВДМ			
Частота вращения <i>n</i> , об/мин	0	3400	10460	0	3000	4500
Длительный момент M , Н·м	3,6	2,43	0	7,0	2,33	0

Экспериментальные результаты могут быть представлены в линейном приближении в виде двух прямых (рисунок 3), которые пересекаются в точке пересечения с координатами: M = 2,64 H·м; n = 2800 об/мин.



Рисунок 3 – Экспериментальные данные БВДМ (кривая 1) и ПВДМ (кривая 2)

Для повышения качества использования БВДМ в его математической модели были произведены следующие мероприятия:

1. Уменьшить высоту спинки ярма статора с 5,5 до 2 мм, соответственно диаметр ротора увеличивается при не изменению наружного диаметра статорного сердечника. С помощью этого мероприятия момент ВД увеличивается на 9,7 % при номинальном токе.

2. Заполнить индуктор и межполюсные промежутки на роторе тем же магнитотвердым материалом, имеющие либо радиальное, либо тангенциальное направления намагничивания. С помощью двух этих модернизаций момент ВД увеличивается соответственно 11,3 и 14,6 % при номинальном токе.

3. Увеличить толщину магнитов с 4,3 до 5 и 6 мм. В результате увеличение электромагнитного момента ВД составляет соответственно на 3,4 и 8,2 %, принимая значения 3,7 и 3,9 Н·м.

С помощью всех представленных мероприятий позволяет первоначальный момент БВДМ увеличиться на 33%, т.е. его величина

увеличится до 4,8 Н·м. Таким образом момент БВДМ составит 69 % от момента ПВДМ.

Анализ величин обмотки статора и активного сопротивления при сохранении омических потерь в нем для различного исполнения обмотки ВД [80] представлен в нижеследующей таблице 3.

Таблица 3 – Результаты анализа ВД с различными исполнениями обмотками статора

		Активное	Потери	
	Ток обмотки, А	сопротивление	в обмотке,	
		обмотки, Ом	Вт	
Распределённая обмотка	3,0	0,74	20,0	
Сосредоточенная обмотка	3,7	0,49	20,0	
Беспазовая обмотка	2,2	1,33	20,0	

В таблице 3 показывает, что электромагнитный момент ВД пропорционален току статора, следовательно, момент БВДМ составит 2,2 · 100 / 3,0 = 73 % момента ПВДМ с распределённой обмоткой.

1.4 Беспазовые магнитоэлектрические вентильные двигатели с медно-железными проводниками обмотки статора

Провели исследование [67, 68] Полученные результаты показывают, что магнитоэлектрические вентильные двигатели в беспазовом исполнении с комбинированным проводом, их электромагнитный момент может увеличить в 2 раза больше, чем по сравнению момента того же двигатель с медным проводом (рисунок 4). Следовательно, момент БВДМ с комбинированной обмоткой статора может не уступить моменту ПВДМ с обычной обмоткой статора. Из рисунки 4 видно, что преимущество комбинированного провода уменьшается при скоростях более 8000 об/мин и полностью исчезает, когда скорости примерно выше 30000 об/мин, свойства беспазовых вентильных двигателей с комбинированной и медной обмоткой статора становятся одинаковыми.



Рисунок 4 – Характеристики БВДМ момент – скорость вращения при постоянстве потерь: кривая 1 – БВДМ с комбинированным проводом кривая 2 – БВДМ с обычным проводом;

Следует отметить, что при достаточно больших скоростях вращения, в БВДМ потери заметно проявляются в железе комбинированного провода и статора, но при обычных скоростях (рисунок 5) видно, что потери значительно будут в меди.



Рисунок 5 – Сравнительная величина суммарных потерь в БВДМ при различных скоростях вращения

При высоких скоростях вращения комбинированный провод с железной основой и медной оболочкой с точки зрения потерь окажется более лучшим вариантом для использования в БВДМ, так как наружный ток в меди (он превышает ток в железном сечении) не будет наводить вихревые токи во внутреннем железе. В противоположной структуре провода переменное магнитное поле тока в меди будет вызывать вихревые токи в наружном железе. Из-за эффекта вытеснения этих вихревых токов к наружной поверхности провода потери в железе при высокой частоте могут быть значительными [49].

1.5 Выводы по главе 1

1. Трехфазные двухслойные обмотки найдут широкое применение в беспазовых вентильных машинах, так как имеют следующие преимущества: размеры и формы катушек и групп одинаковы, возможность выполнения с любым шагом, простая форма всех частей.

2. Современные высококоэрцитивные постоянные магниты Nd-Fe-B можно считать наилучшим вариантом для применения в качестве индуктора на роторах БВДМ. Они имеют высокую намагниченность, высокую

коэрцитивную силу и магнитную проницаемость, близкую к магнитной проницаемости воздуха.

3. Электромагнитный момент БВДМ с обычными обмотками может достигать 69 % момента ПВДМ. При использовании комбинированного провода (с медной основой и железной оболочкой) в обмотке БВДМ его момент может не уступать моменту ПВДМ.

4. Когда БВДМ работает на высоких скоростях вращения, комбинированный провод с медной оболочкой и железной основы с точки зрения потерь можно считать лучшим вариантом для использования в двигателе.

5. Беспазовое исполнение статора в вентильных электродвигателях позволяет уменьшить габариты двигателя, снизить реактивную ЭДС, улучшить коммутацию тока электронного коммутатора.

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ БВДМ С МЕДНЫМ ПРОВОДОМ В ПОЛЕВОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ФОРМЕ

2.1 Аналитическая модель магнитного поля в активной зоне беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя

В воздушном зазоре между ротором и статором электрических машин физические происходят все основные явления (формирование электромагнитного момента, взаимное преобразование механических и электромагнитных энергий). Высококоэрцитивные постоянные магниты Nd-Fe-B обладают магнитной проницаемостю, близкой К магнитной проницаемости воздуха, также массив таких магнитов можно рассматривать как немагнитный зазор.

Далее будет показано, что магнитное поле в немагнитном зазоре БВДМ можно описать при использовании периодических комплексных потенциальных функций.

Известно общее решение граничной задачи Дирихле для бесконечной полосы при периодическом изменении магнитного потенциала $u(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n sinn \alpha x$ на нижней граничной стороне (для которой y = 0), полученное методом разделения переменных

$$u(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n sh[n\alpha(\delta - y)]sinn\alpha x}{sh n\alpha\delta},$$
(1)

где $\alpha = \pi/\tau$; δ – ширина полосы; τ – полюсное деление.

Если считать эту зависимость (1) (после умножения её на мнимую единицу j) скалярным магнитным потенциалом и вычислить сопряженную ей гармоническую функцию магнитного потока v(x, y), то комплексный

скалярный магнитный потенциал для бесконечной полосы плоскости *z* получено

$$w(z) = v(x, y) + ju(x, y).$$

Источником плоскопараллельного магнитного поля призматического магнита с прямоугольным поперечным сечением являются встречные токи $I_{\rm M} = 2H_{CB}h_{\rm M}$ двух параллельных шин, имеющих высоту $2b = h_{\rm M}$ ($h_{\rm M}$ – высота магнита в направлении его намагниченности), толщину a и находящиеся на расстоянии ширины магнита $b_{\rm M}$ [7].

В общем случае распределение потенциала на нижней стороне полосы с помощью учета характера расположения постоянных магнитов на ярме ротора можно описать в тригонометрических рядах с наличием слагаемых синусных и косинусных

$$u(x) = \frac{I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\alpha x + b_n \sin n\alpha x).$$
⁽²⁾

В бесконечной горизонтальной полосе плоскости z = x + jy ток $I_{\rm M}$ магнитных шин ротора вызовет комплексный скалярный магнитный потенциал, который после его применения к основной косинусной гармонике формулы (2), представлен в виде [9]

$$w_{cos}(z) = v(x, y) + ju(x, y) = \frac{-I_{M}a_{1}}{2sh\alpha\delta} \begin{cases} sin\alpha x ch[\alpha(y-\delta)] + \\ + j cos\alpha x sh[\alpha(y-\delta)] \end{cases}$$

$$= -\frac{I_{M}a_{1}}{2sh\alpha\delta} sin[\alpha(z-j\delta)].$$
(3)

Тогда получим комплексный скалярный магнитный потенциал, учитывающий весь спектр косинусных гармоник

$$w_{cos}(z) = -\frac{I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n \sin[\alpha(z-j\delta)n]}{sh n\alpha\delta} = -\frac{I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n [\sin n\alpha x \ chn\alpha(y-\delta) + j \ cos n\alpha x shn\alpha(y-\delta)]}{sh n\alpha\delta}.$$
(4)

Так же может быть получен комплексный скалярный магнитный потенциал, учитывающий весь спектр синусных гармоник выражения (2)

$$w_{sin}(z) = -\frac{I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n \{ \cos n\alpha x ch [n\alpha(\delta - y)] - j \sin n\alpha x sh [n\alpha(\delta - y)] \}}{sh n\alpha \delta}$$

$$= -\frac{I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n \cos n\alpha (z^{\bullet} + j\delta)}{sh n\alpha \delta},$$
(5)

где $z^{\bullet} = x - jy$ – комплексно-сопряжённый вектор.

Можно записать выражение (5) в комплексно - сопряжённой форме для вектора $w^{\bullet}_{sin}(z)$

$$w^{\bullet}_{sin}(z) = -\frac{I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n \{\cos n\alpha x ch[n\alpha(\delta - y)] + j \sin n\alpha x sh[n\alpha(\delta - y)]\}}{sh n\alpha\delta}$$

$$= -\frac{I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n \cos n\alpha(z - j\delta)}{shn\alpha\delta}.$$
(6)

Комплексно-сопряжённый вектор магнитной индукции справедливо [32] имеет формулу

$$B^{\bullet}(z) = j\mu_0 \frac{d w(z)}{d z}.$$
(7)

Магнитная индукция, которую создадут косинусные гармоники скалярного магнитного потенциала магнитов ротора при использовании выражения (7) применительно в формуле (4), представлена следующим выражением

$$B_{cos}^{\bullet}(z) = -\frac{\mu_0 \alpha I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n a_n \begin{cases} \sin n\alpha x \sinh n\alpha (y-\delta) + \\ + j \cos n\alpha x \cosh \alpha (y-\delta) \end{cases}}{\sinh n\alpha \delta}$$

$$= -\frac{j\mu_0 \alpha I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n a_n \cos [n\alpha (z-j\delta)]}{\sinh n\alpha \delta}.$$
(8)

Поскольку [20]

$$B(z) = -j\mu_0 \frac{d w^{\bullet}(z)}{dz}.$$
(9)

Магнитная индукция, которую создадут синусные гармоники скалярного магнитного потенциала магнитов ротора с помощью выражения (9) применительно к формуле (6), получена в формуле

$$B_{sin}(z) = -\frac{\mu_0 \alpha I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n b_n \left\{ -\cos n \alpha x shn \alpha (y-\delta) + \right\} + j \sin n \alpha x chn \alpha (y-\delta) \right\}}{sh n \alpha \delta}$$
(10)
= $-\frac{j \mu_0 \alpha I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n b_n \sin [n \alpha (z-j\delta)]}{sh n \alpha \delta}.$

Скалярный магнитный потенциал магнитов на поверхности сердечника ротора имеет вид в синусном ряде

$$u(x, 9) = \frac{I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\alpha x = \frac{4}{\pi} \frac{I_{\rm M}}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta (2n-1)}{2n-1} \sin [\alpha (2n-1)(x-9)].$$
 (11)

Составляющие индукции магнитного поля по осям x и y, вызванной постоянными магнитами в соответствии с формулой (10), будут иметь вид

$$B_{px}(x, y, \vartheta) = \frac{2\mu_0 \alpha I_{\rm M}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta (2n-1)}{sh\alpha (2n-1)\delta} sh[\alpha (2n-1)(y-\delta)] \cos[\alpha (2n-1)(x-\vartheta)] (12)$$

$$B_{py}(x, y, \vartheta) = -\frac{2\mu_0 \alpha I_{\rm M}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta} ch[\alpha(2n-1)(y-\delta)] sin[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)], (13)$$

где *β* – угловой промежуток между краями соседних магнитов разной полярности, *Э* – сдвиг аналогичной оси магнитного поля статора относительно продольной оси ротора.

На рисунке 6 показаны составляющие индукции магнитного поля рассматриваемого макетного образа БВДМ с параметрами, показанными в параграфе 1.3, двигатель имеет неодим-железо-боровые магниты высотой 7,3 мм и номинальный ток $I_{\rm H} = 5$ А, приведены



Рисунок 6 – Составляющие индукции магнитного поля по осям *y* (сплошная линия) и *x* (пунктирная линия) на поверхности магнитов (*y* = *h*_м), вызванные МДС магнитов

Магнитодвижущая сила *m* фазной обмотки статора справедливы выражения бегущих волн основной и высших гармоник [65], представлена в формуле

$$F_{txv} = F_{Atxv} + F_{Btxv} + F_{Ctxv} + \dots =$$

$$= \frac{\tilde{m}}{2} \begin{cases} F_{m1}sin(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}) + \sum_{k=1}^{\infty} F_{m(2\tilde{m}k-1)}sin\left[\omega t + \frac{(2\tilde{m}k-1)x\pi}{\tau}\right] \\ + \sum_{k=1}^{\infty} F_{m(2\tilde{m}k+1)}sin\left[\omega t - \frac{(2\tilde{m}k+1)x\pi}{\tau}\right]. \end{cases}$$
(14)

где $F_{mv} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I \frac{wk_{wv}}{vp}$; $F_{m1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I \frac{wk_{w1}}{p}$ – амплитуды магнитодвижущей силы

соответственно высших гармоник и основной одной фазы обмотки статора; k = 1,2,...

Для основной бегущей волны координаты x и t связаны друг с другом равенством, вытекающим из формулы (14)

$$x(t) = \frac{\omega\tau}{\pi}t + C = \frac{\omega}{\alpha}t + C.$$
 (15)

Эта временная зависимость подразумевается для всех предыдущих и последующих формул, содержащих координату *x*.

Можем записать выражение (14) в виде

$$F_{txv} = \frac{\widetilde{m}}{2} F_{m1} \left(sin \omega t \cos \frac{x\pi}{\tau} - \cos \omega t \sin \frac{x\pi}{\tau} \right) + \frac{\widetilde{m}}{2} \sum_{k=1}^{\infty} F_{m(2\widetilde{m}k-1)} \left[sin \omega t \cos \frac{(2\widetilde{m}k-1)x\pi}{\tau} + \cos \omega t \sin \frac{(2\widetilde{m}k-1)x\pi}{\tau} \right] + (16) + \frac{\widetilde{m}}{2} \sum_{k=1}^{\infty} F_{m(2\widetilde{m}k+1)} \left[sin \omega t \cos \frac{(2\widetilde{m}k+1)x\pi}{\tau} - \cos \omega t \sin \frac{(2\widetilde{m}k+1)x\pi}{\tau} \right].$$

Комплексный скалярный потенциал магнитного поля в немагнитном зазоре, вызванный весь спектр пространственных косинусных гармоник в соответствии с выражением (4), представлен следующим выражением

$$\begin{split} w_{cos}(z) &= -\frac{\sqrt{2}\tilde{m}}{\pi} \frac{w}{p} I \sin(\omega t) \times \\ &\times \begin{cases} \frac{k_{wl} [\sin(\alpha x) ch(\alpha y) + j \cos(\alpha x) sh(\alpha y)]}{sh(\alpha \delta)} + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y + j \cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta} + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x ch(2\tilde{m}k+1)\alpha y + j \cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x sh(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{(2\tilde{m}k+1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta} \end{cases}$$

$$= -\frac{\sqrt{2}\tilde{m}}{\pi} \frac{w}{p} I \sin(\omega t) \times \begin{cases} \frac{k_{w1} \sin[\alpha(z)]}{sh\alpha \delta} + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} \sin[(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta} \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} \sin[(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta} + \end{cases}$$

$$(17)$$

где *I* – действующее значение тока обмотки фазы статора.

Так же может быть получен комплексный скалярный магнитный потенциал в немагнитном зазоре, вызванный всем спектром пространственных синусных гармоник формулы (16):

$$\begin{split} w_{sin}(z) &= -\frac{\sqrt{2\tilde{m}}}{\pi} \frac{w}{p} I \cos(\omega t) \times \\ &\times \begin{cases} \frac{k_{w1} [\cos(\alpha x) ch(\alpha y) - j \sin(\alpha x) sh(\alpha y)]}{sh(\alpha \delta)} + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\cos(2\tilde{m}k - 1)\alpha x ch(2\tilde{m}k - 1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k - 1)\alpha x sh(2\tilde{m}k - 1)\alpha y]}{(2\tilde{m}k - 1)sh(2\tilde{m}k - 1)\alpha \delta} + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\cos(2\tilde{m}k + 1)\alpha x ch(2\tilde{m}k + 1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k + 1)\alpha x sh(2\tilde{m}k + 1)\alpha y]}{(2\tilde{m}k + 1)sh(2\tilde{m}k + 1)\alpha \delta} + \\ &= -\frac{\sqrt{2\tilde{m}}}{\pi} \frac{w}{p} I \cos(\omega t) \begin{cases} \frac{k_{w1} \cos[\alpha(z)]}{sh \alpha \delta} + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \cos[(2\tilde{m}k - 1)\alpha \delta]}{(2\tilde{m}k - 1)sh(2\tilde{m}k - 1)\alpha \delta} \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} \cos[(2\tilde{m}k - 1)\alpha \delta]}{(2\tilde{m}k - 1)sh(2\tilde{m}k - 1)\alpha \delta} \end{cases} \end{split}$$
(18)

Для комплексного скалярного потенциала магнитного поля всей обмотки статора соответственно с выражением (16):

$$\begin{split} w_{\text{crarop}}(x,y) &= \left[w_{\cos}(x,y) + w_{\sin}(x,y) \right] == -\frac{\sqrt{2\tilde{m}}}{\pi} \frac{w}{p} I \times \\ &\left\{ \begin{array}{l} \sin(\omega t) \frac{k_{wl} \left[ch(\alpha y) \sin \alpha x + jsh(\alpha y) \cos \alpha x \right]}{sh(\alpha \delta)} \\ - \cos(\omega t) \frac{k_{wl} \left[ch(\alpha y) \cos \alpha x - jsh(\alpha y) \sin \alpha x \right]}{sh(\alpha \delta)} \\ + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} \left[ch(2\tilde{m}k+1)\alpha y \sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x + jsh(2\tilde{m}k+1)\alpha y \cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x \right]}{(2\tilde{m}k+1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta} + \\ - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} \left[ch(2\tilde{m}k+1)\alpha y \cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x - jsh(2\tilde{m}k+1)\alpha y \sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x \right]}{(2\tilde{m}k+1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta} + \\ + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x + jsh(2\tilde{m}k-1)\alpha y \cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x \right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta} + \\ + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y \cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x + jsh(2\tilde{m}k-1)\alpha y \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x \right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta} + \\ + \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y \cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x - jsh(2\tilde{m}k-1)\alpha y \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x \right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta} + \\ \end{array} \right]$$

Эту формулу можно записать в коротком виде

$$w_{\text{crarop}}(z) = \left[w_{cos}(z) + w_{sin}(z)\right] = \left\{ sin(\omega t) \frac{k_{w1}[sin\alpha z]}{sh(\alpha\delta)} - cos(\omega t) \frac{k_{w1}[cos\alpha z]}{sh(\alpha\delta)} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[sin(2\tilde{m}k+1)\alpha z)]}{(2\tilde{m}k+1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta} - cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[cos(2\tilde{m}k+1)\alpha z)]}{(2\tilde{m}k+1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[sin(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta} + cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[cos(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta} + cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[cos(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta]}{(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta} + cos(\omega t) \sum_$$

На рисунке 7 показаны составляющие скалярного потенциала магнитного поля обмотки статора на поверхности магнитов ($y = h_{\rm M}$) – кривые

1 и 3, на внутренней поверхности статора ($y = \delta$) – кривые 2 и 4 рассматриваемого макета БВДМ, рассчитанные по выражению (20) для момента времени t = 0.



Рисунок 7 – Составляющие скалярного потенциала магнитного поля по осям *у* (кривые 1 и 2) и *х* (кривые 3 и 4), вызванные магнитодвижущей силой обмотки статора

Видим, что кривая 1 является классической для МДС трёхфазной обмотки статора, имеющей q = 2.

В соответствии с формулой (20) комплексно-сопряжённый вектор магнитной индукции, вызванной током обмотки статора, представлен в следующей формуле

$$B^{\bullet}(z) = j\mu_{0} \frac{d w_{\text{crarop}}(z)}{d z} =$$

$$= -j \frac{\sqrt{2}\tilde{m}\mu_{0}\alpha}{\pi} \frac{w}{p} I \times \begin{cases} \sin(\omega t) \frac{k_{w1}[\cos\alpha z]}{sh(\alpha\delta)} + \cos(\omega t) \frac{k_{w1}[\sin\alpha z]}{sh(\alpha\delta)} + \\ + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha z]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta} + \\ + \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha z]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta} + \\ + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta} - \\ - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta} . \end{cases}$$

$$(21)$$

Выражения составляющих индукции магнитного поля по осям *x* и *y*, вызванной током обмотки статора можно получить после выделения в выражении (21) мнимых и вещественных частей:

$$B_{cx}(x, y, t) = -\frac{\sqrt{2\tilde{m}\mu_{0}\alpha}}{\pi} \frac{w}{p} I \times \begin{cases} \sin(\omega t) \frac{k_{w1}[\sin\alpha x sh\alpha y]}{sh(\alpha\delta)} - \cos(\omega t) \frac{k_{w1}[\cos\alpha x sh\alpha y]}{sh(\alpha\delta)} + \\ + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x sh(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta} - \\ - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x sh(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta} + \\ + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta} + \\ + \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta} . \end{cases}$$
(22)

$$B_{cy}(x, y, t) = \frac{\sqrt{2\tilde{m}\mu_{0}\alpha}}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ sin(\omega t) \frac{k_{w1}[cos \alpha xch\alpha y]}{sh(\alpha \delta)} + cos(\omega t) \frac{k_{w1}[sin\alpha xch\alpha y]}{sh(\alpha \delta)} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[cos(2\tilde{m}k+1)\alpha xch(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta} + cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[sin(2\tilde{m}k+1)\alpha xch(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[cos(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta} - cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[sin(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha xch($$

Составляющие индукции магнитного поля на поверхности постоянных магнитов рассматриваемого макетного БДВМ, учитывающие по формулам (22), (23) для момента времени t = 0, показаны на рисунке 8.



Рисунок 8 – Составляющие индукции магнитного поля по осям у (сплошная линия) и x (пунктирная линия) на поверхности постоянных магнитов (y = h_м), вызванные током обмотки статора

2.2 Аналитическая модель магнитного поля в ярмовых участках беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя

Магнитное поле в немагнитном зазоре можно описать с помощью периодических комплексных потенциальных функций, имеющем вид бесконечной полосы с гладкими границами, содержащее, тем не менее, обмоточные и зубцовые гармоники, обусловленные источниками магнитных полей статора и ротора.

Ярмовые участки магнитопроводов статора и ротора можно представить также в виде двух бесконечных полос соответствующей ширины, примыкающих сверху и снизу к бесконечной полосе воздушного зазора.

2.2.1 Магнитное поле в ярме статора

Источник поля – МДС обмотки статора. Ярмо статора представлено бесконечной полосой шириной δ_1 и относительной магнитной проницаемостью μ_{r1} . На общей границе этой полосы и полосы воздушного зазора расположен источник магнитного поля – скалярный магнитный потенциал в виде известной магнитодвижущей силы \tilde{m} фазной обмотки статора, который можно представить бесконечным рядом Фурье в формуле (14).

Формулы (22), (23) получены при начальном предположении, что тангенциальные составляющие магнитной индукции на границах полосы воздушного зазора равны нулю, т.е. считается, что магнитные проницаемости ярем статора и ротора равны бесконечности.

При конечных значениях магнитной проницаемости ярем для тангенциальной составляющей магнитной индукции в полосе воздушного зазора будет справедлива формула
$$B^{\bullet}_{cx}(x,y) = -\frac{\sqrt{2\tilde{m}\mu_{0}\mu_{r1}\alpha}}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ sin(\omega t) \frac{k_{w1}[sin\alpha xch\alpha y]}{sh \alpha \delta} - cos(\omega t) \frac{k_{w1}[cos\alpha xch\alpha y]}{sh \alpha \delta} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[sin(2\tilde{m}k+1)\alpha xch(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta} - cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[cos(2\tilde{m}k+1)\alpha xch(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[sin(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta} + cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[cos(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-$$

Из неё следует, что тригонометрические зависимости с аргументом x остались такими же, как и в выражении (22), а гиперболические зависимости с аргументом y изменились: вместо sinh появился cosh и наоборот.

Формула (24) показывает, что на границах полосы воздушного зазора (y=0 и $y=\delta$) тангенциальная магнитная индукция не равна нулю. Этот результат соответствует физической природе рассматриваемого магнитного поля.

Магнитное поле в ярмовой полосе статора шириной δ_1 и с относительной магнитной проницаемостью μ_{r1} , вызванное током статора, будет описываться формулами

по оси X:

$${}^{c}B_{cx}(x,y) = -\frac{\sqrt{2\tilde{m}\mu_{0}\mu_{r1}\alpha}}{\pi} \frac{w}{p} I \times \begin{cases} \sin(\omega t) \frac{k_{w1}[\sin\alpha xch\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(\alpha\delta_{1})} - \cos(\omega t) \frac{k_{w1}[\cos\alpha xch\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(\alpha\delta_{1})} + \\ + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha xch(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} - \\ - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha xch(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} + \\ + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} + \\ + \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} . \end{cases}$$

$$(25)$$

По оси у:

$${}^{c}B_{cy}(x,y) = \frac{\sqrt{2}\widetilde{m}\mu_{0}\alpha}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ \begin{array}{l} \sin(\omega t) \frac{k_{wl}[\cos\alpha xsh\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(\alpha\delta_{1})} + \cos(\omega t) \frac{k_{wl}[\sin\alpha xsh\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(\alpha\delta_{1})} + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k+1)}[\cos(2\widetilde{m}k+1)\alpha xsh(2\widetilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\widetilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} + \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k+1)}[\sin(2\widetilde{m}k+1)\alpha xsh(2\widetilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\widetilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[\cos(2\widetilde{m}k-1)\alpha xsh(2\widetilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\widetilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[\sin(2\widetilde{m}k-1)\alpha xsh(2\widetilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\widetilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[\sin(2\widetilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\widetilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[\sin(2\widetilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\widetilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[\sin(2\widetilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\widetilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[\cos(\omega t-1)\alpha\delta_{1}} - \cos(\omega t) \sum_{k=1$$

Формулы (25), (26) в соответствии с физикой явлений показывают, что на наружной границе полосы ($y = \delta_1$) присутствует тангенциальная и отсутствует радиальная составляющие индукции, на внутренней границе (y = 0) присутствуют обе эти составляющие.

Для выполнения условий сопряжения магнитного поля на границе двух рассматриваемых полос (воздушного зазора и ярма статора)

$$B_{cx}(x,\delta) = {}^{c}B_{cx}(x,0)/\mu_{r1}, \ B_{cy}(x,\delta) = {}^{c}B_{cy}(x,0)$$
(27)

следует преобразовать (привести) формулы (25) и (26) для ярмовой полосы статора путем введения в них соответствующих граничных коэффициентов. После этой процедуры приведения формул к условиям сопряжения магнитных полей выражения для приведенных магнитных индукций ярма статора будут иметь вид

$${}^{c}B^{\bullet}_{cx}(x,y) = -\frac{\sqrt{2}\tilde{m}\mu_{0}\mu_{r1}\alpha}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ k_{cx}\sin(\omega t) \frac{k_{w1}[\sin\alpha xch\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(\alpha\delta_{1})} - k_{cx}\cos(\omega t) \frac{k_{w1}[\cos\alpha xch\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(\alpha\delta_{1})} + k_{cx2}(k)\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha xch(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} - k_{x2}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha xch(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} + k_{cx1}(k)\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} + k_{cx1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} + k_{cx1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k$$

где

$$k_{cx} = \frac{sh\alpha\delta_1}{ch\alpha\delta_1}; \ k_{cx1}(k) = \frac{sh(k-1)\alpha\delta_1}{ch(k-1)\alpha\delta_1}; \ k_{cx2}(k) = \frac{sh(k+1)\alpha\delta_1}{ch(k+1)\alpha\delta_1},$$
(29)

– коэффициенты приведения.

$${}^{c}B^{\bullet}{}_{cy}(x,y) = \frac{\sqrt{2\tilde{m}\mu_{0}\alpha}}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ k_{cy}\sin(\omega t) \frac{k_{w1}[\cos\alpha xsh\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(\alpha\delta_{1})} + k_{cy}\cos(\omega t) \frac{k_{w1}[\sin\alpha xsh\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(\alpha\delta_{1})} + k_{cy2}(k)\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha xsh(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} + k_{cy2}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha xsh(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} + k_{cy1}(k)\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha xsh(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} - k_{cy1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha xsh(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} \right\},$$
(30)

где

$$k_{cy} = -\frac{ch\alpha\delta}{sh\alpha\delta}; \ k_{cy1}(k) = -\frac{ch(k-1)\alpha\delta}{sh(k-1)\alpha\delta}; \ k_{cy2}(k) = -\frac{ch(k+1)\alpha\delta}{sh(k+1)\alpha\delta},$$
(31)

– коэффициенты приведения.

Рисунки 9 и 10 иллюстрируют идентичный импульсный характер изменения индукций на границе двух полос в пределах магнитного периода. Импульсный характер этих кривых объясняется тем, что они получились в результате дифференцирования ступенчатой кривой МДС обмотки статора.



Рисунок 9 – Сопряжение со скачкообразным разрывом тангенциальных составляющих магнитной индукции от тока статора на границе воздушного зазора и ярма статора



Рисунок 10 – Сопряжение радиальных составляющих магнитной индукции от тока статора на границе воздушного зазора и ярма статора

По формулам (28), (30) построены кривые составляющих магнитной индукции внутри и на наружной границе ярма статора ($y = \delta_1$), показанные на рисунке 11.



Рисунок 11 – Радиальные (кривые 1, 2, 3) и тангенциальные (кривая 4) составляющие магнитной индукции в ярме статора от тока статорной обмотки, построенные для линий со значениями координаты у соответственно: 0,2 δ₁; 0,6 δ₁; δ₁; δ₁

Источник поля – магниты на роторе. Представляя скалярный магнитный потенциал магнитов, расположенных в воздушной полосе на поверхности ярма ротора (на нижней границе бесконечной полосы воздушного зазора шириной б), синусным рядом представляется в формуле (11).

Формула (12) получена в предположении, что ферромагнитные ярма, примыкающие к границам полосы воздушного зазора, имеют бесконечно большую магнитную проницаемость. При наличии ярем с $\mu_r \neq \infty$ формулу для тангенциальной составляющей индукции следует записать в виде

$$B^{\bullet}_{px}(x, y, \vartheta) = \frac{2\mu_0 \alpha I_{M}}{\pi} \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{\sinh\alpha(2n-1)\delta} \cos[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] \cosh[\alpha(2n-1)(y-\delta)].$$
(32)

В этом случае на границе с ярмом статора (*y* = δ) эта составляющая индукции в воздушном зазоре не будет равна нулю.

Перенеся источник магнитного поля (11) на нижнюю границу полосы ярма статора шириной δ₁, можем записать формулы для магнитной индукции в этой полосе с учётом граничных условий для двух рассматриваемых полос

$${}^{p}B^{\bullet}_{cx}(x, y, \vartheta) = \frac{2\mu_{0}\mu_{r1}\alpha I_{M}}{\pi} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta_{1}} k_{cx}(n) \cos[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] \cosh[\alpha(2n-1)(y-\delta_{1})].$$
(33)

$${}^{p}B^{\bullet}{}_{cy}(x,y,\vartheta) = -\frac{2\mu_{0}\alpha I_{M}}{\pi} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{\sinh\alpha(2n-1)\delta_{1}} k_{cy}(n) \sin[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] \sinh[\alpha(2n-1)(y-\delta_{1})],$$
(34)

где

$$k_{cx}(n) = \frac{sh[(2n-1)\alpha\delta_{1}]}{sh[(2n-1)\alpha\delta]} \frac{1}{ch[(2n-1)\alpha(\delta-\delta_{1})]}$$

$$k_{cy}(n) = \frac{sh[(2n-1)\alpha\delta_{1}]}{sh[(2n-1)\alpha\delta]} \frac{1}{sh[(2n-1)\alpha(\delta-\delta_{1})]},$$
(35)

– коэффициенты приведения.

На рисунках 12 и 13 показаны граничные значения магнитной индукции на периоде магнитного поля, построенные по формулам (12), (33) и (13), (34) для положения ротора $\vartheta = \tau/2$.



Рисунок 12 – Изменение тангенциальных составляющих магнитной индукции, вызванных магнитами ротора, на границе воздушного зазора

и ярма статора с $\mu_{r1} = 10$ при $\vartheta = \tau/2$



Рисунок 13 – Изменение радиальных составляющих магнитной индукции, вызванных магнитами ротора, на границе воздушного зазора и ярма статора при $\vartheta = \tau/2$

На рисунках 14 и 15 показаны кривые результирующих соответственно радиальных и тангенциальных составляющих магнитных индукций для внутренних точек ярма статора, вызванных токами статора и магнитов ротора при $\vartheta = \tau/2$.



Рисунок 14 – Кривые результирующих радиальных магнитных индукций в ярме статора на линиях, находящихся на расстоянии от внутреннего края ярма:

В́x, Тл 4 2 0 -2 -4 0 0.02 0.04 0.05 x, M

Рисунок 15 – Кривые результирующих тангенциальных магнитных индукций в ярме статора с μ_{r1} =10 на линиях, находящихся на расстоянии от внутреннего края ярма: сплошная линия – 0,2 δ₁; точечная линия– 0,4 δ₁; пунктирная линия – δ₁ (δ₁ – высота ярма статора)

$$1-0,2\,\delta_{_1};\,2-0,6\;\;\delta_{_1};\,3-\delta_{_1}$$

2.2.2 Магнитное поле в ярме ротора

Источник поля – МДС обмотки статора. Тангенциальное магнитное поле в ярмовой полосе ротора шириной δ_2 и с относительной магнитной проницаемостью μ_{r2} , вызванное током статора, будет описываться формулой

$${}^{c}B^{\bullet}_{px}(x,y) = -\frac{\sqrt{2\tilde{m}\mu_{0}\mu_{r2}\alpha}}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ k_{px}\sin(\omega t) \frac{k_{w1}[\sin\alpha xch\alpha(y-\delta_{2})]}{sh(\alpha\delta_{2})} - k_{px}\cos(\omega t) \frac{k_{w1}[\cos\alpha xch\alpha(y-\delta_{2})]}{sh(\alpha\delta_{2})} + k_{px2}(k)\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha xch(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{2})]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{2}} - k_{px2}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha xch(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{2})]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{2}} + k_{px1}(k)\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{2})]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{px1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{2})]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} - k_{px1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{2})]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{px1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha xch(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{2})]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} - k_{px1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} - k_{w1}(k)\cos(\omega t)\cos(\omega t)\cos(\omega t)} - k_{w1}(k)\cos(\omega t)\cos(\omega t)\cos$$

где

$$k_{px} = \frac{sh(\alpha\delta_2)}{sh(\alpha\delta)}; k_{px1}(k) = \frac{sh[\alpha\delta_2(2\tilde{m}k-1)]}{sh[\alpha(\delta)(2\tilde{m}k-1)]}; k_{px2}(k) = \frac{sh[\alpha\delta_2(2\tilde{m}k+1)]}{sh[\alpha(\delta)(2\tilde{m}k+1)]}$$
(37)

– коэффициенты приведения.

Для радиальной составляющей магнитной индукции в ярме ротора будем иметь

$${}^{c}B^{\bullet}{}_{py}(x,y) = -\frac{\sqrt{2\tilde{m}\mu_{0}\mu_{r2}\alpha}}{\pi} \frac{w}{p}I \times \left\{ k_{py}\sin(\omega t) \frac{k_{w1}[\cos\alpha x sh\alpha y]}{sh(\alpha \delta_{2})} - k_{py}\cos(\omega t) \frac{k_{w1}[\sin\alpha x sh\alpha y]}{sh(\alpha \delta_{2})} + k_{py2}(k)\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x sh(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_{2}} - k_{py2}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x sh(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1$$

где
$$k_{py} = \frac{1}{sh(\alpha\delta)}; k_{py1}(k) = \frac{1}{sh[\alpha\delta(2\tilde{m}k-1)]}; k_{py2}(k) = \frac{1}{sh[\alpha\delta(2\tilde{m}k+1)]}.$$
 (39)

– коэффициенты приведения.

Графики изменения магнитных индукций, вызванных током статора, на общей границе воздушного зазора и ярма ротора показаны на рисунках 16 и 17.



Рисунок 16 – Тангенциальные составляющие магнитной индукции на границе воздушного зазора и ярма ротора с $\mu_{r_2} = 10$, вызванные током статора



Рисунок 17 – Радиальные составляющие магнитной индукции, вызванные током статора, на границе воздушного зазора и ярма ротора

Источник поля – магниты ротора. В полосе воздушного зазора магниты расположены на нижней границе. В полосе ярма ротора магниты, естественно, должны располагаться на верхней границе. Этот источник создаёт в ярме ротора магнитное поле, которое будет описываться уравнениями

$${}^{p}B^{\bullet}{}_{px}(x,y,\vartheta) = \frac{2\mu_{0}\mu_{r2}\alpha I_{M}}{\pi} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta_{1}} k_{px}(n) \cos[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)]ch[\alpha(2n-1)y]$$

$${}^{p}B^{\bullet}{}_{py}(x,y,\vartheta) = -\frac{2\mu_{0}\alpha I_{M}}{\pi} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta_{1}} k_{py}(n) \sin[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)]sh[\alpha(2n-1)y]$$

$$(41)$$

где

$$k_{px}(n) = -\frac{sh[(2n-1)\alpha\delta_2]}{ch[(2n-1)\alpha\delta_2]}; \ k_{py}(n) = \frac{ch[(2n-1)\alpha\delta]}{sh[(2n-1)\alpha\delta]}$$
(42)

Результирующие значения магнитных индукций в ярме ротора, обусловленные магнитами на роторе и токами обмотки статора, показаны на рисунках 18 и 19.



Рисунок 18 – Распределение в ярме ротора с $\mu_{r2} = 5$ результирующей тангенциальной индукции на различных уровнях от внутренней поверхности ярма: сплошная кривая – y = 0; точечная кривая – $y = 0,2\delta_2$; пунктирная кривая – $y = 0,4\delta_2$



Рисунок 19 – Распределение в ярме ротора результирующей радиальной индукции на различных уровнях от внутренней поверхности ярма: сплошная кривая – y = 0; точечная кривая – y = 0,5δ₂;

пунктирная кривая – $y = 0.9\delta_2$

2.3 ЭДС обмотки статора и момент беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя

Беспазовая обмотка, имея достаточно большую толщину, является значительной частью немагнитного зазора беспазового вентильного двигателя (БВД). Другими частями его являются высокоэнергетический магнит и воздушный зазор. В виду относительно большой толщины немагнитного зазора магнитное поле в нём является двухмерным. Анализируем ЭДС обмотки и электромагнитный момент БВД для вариантов одно- и двухмерного характера магнитного поля в зазоре. Показано, что учёт двухмерности магнитного поля для рассматриваемого макета БВД сравнительно мало влияет на его рабочие свойства.

При сдвиге аналогичной оси магнитного поля статора относительно продольной оси ротора на половину полюсного деления ($\vartheta = \tau/2$) составляющие индукции магнитного поля на поверхности магнитов определены в виде:

$$B_{x}(x,h_{\rm M},t,\tau/2) = B_{px}(x,h_{\rm M},\tau/2) + B_{cx}(x,h_{\rm M},t), \qquad (43)$$

$$B_{y}(x,h_{M},t,\tau/2) = B_{py}(x,h_{M},\tau/2) + B_{cy}(x,h_{M},t).$$
(44)

Составляющие индукции магнитного поля поверхности магнитов на роторе БВДМ по осями *у* (кривая 1) и *х* (кривая 2) построены по формулам (43) и (44) на рисунке 20.



Рисунок 20 – Составляющие индукции магнитного поля в воздушном зазоре по осям у (сплошная линия) и x (пунктирная линия) на поверхности постоянных магнитов

Тогда с помощью формулы метода натяжений [29] определим электромагнитный момент

$$M(t) = \frac{plD}{2\mu_0} \int_0^{2\tau} B_y(x, h_{_M}, t, \tau/2) B_x(x, h_{_M}, t, \tau/2) dx, \qquad (45)$$

где *l* – активная длина статора; *p* – число пар полюсов; *D* – диаметр наружной поверхности магнитов ротора.

Значение момента в формуле (45) будет когда основные гармоники магнитодвижущей силы статора и ротора сдвинут относительно на половину полюсного деления.

По другому способу электромагнитный момент можно найти через среднее значение электромагнитной мощности за период изменения.

Мгновенные значения электромагнитного момента и ЭДС фазы обмотки статора, наведенной результирующим потоком индукции магнитного поля в воздушном зазоре по оси *y*, соответственно с выражением (15), представлены следующим выражением:

$$e(t) = -\frac{d\Psi(t)}{dt} = -2plw_{\kappa} \frac{d}{dt} \begin{cases} \sum_{x(t)}^{x(t)+y_{k}} B_{y}[x(t),h_{M},\tau/2]dx + \\ \sum_{x(t)+y_{k}+t_{k}}^{x(t)+y_{k}+t_{k}} B_{y}[x(t),h_{M},\tau/2]dx \end{cases} = \\ = -2plw_{\kappa} \begin{cases} \sum_{x(t)}^{x(t)+y_{k}} \frac{\partial B_{y}[x(t),h_{M},\tau/2]}{\partial t} dx + \int_{x(t)+t_{k}}^{x(t)+y_{k}+t_{k}} \frac{\partial B_{y}[x(t),h_{M},\tau/2]}{\partial t} dx \end{cases} = \\ -2pw_{k}l \frac{\omega}{\alpha} \begin{cases} B_{y}[(x(t)+y_{k}),h_{M},\tau/2] - B_{y}[x(t),h_{M},\tau/2] + \\ +B_{y}[(x(t)+t_{2}),h_{M},\tau/2] - B_{y}[(x(t)+y_{k}+t_{2}),h_{M},\tau/2] \end{cases} \end{cases}$$

$$M(t) = \frac{1}{\Omega} \sum_{j=1}^{\tilde{m}} e \left[t - \frac{(j-1)T}{\tilde{m}} \right] i \left[t - \frac{(j-1)T}{\tilde{m}} \right], \qquad (47)$$

где
$$t_k$$
 – зубцовый шаг; T – период переменного тока; $y_k \le \tau$ – шаг катушек обмотки статора; W_k – число витков в катушке;

Тогда средние значения электромагнитной мощности и момент будут найдены по формулам

$$P_{cp} = \frac{\widetilde{m}}{T} \int_{0}^{T} e(t) i(t) dt, \qquad (48)$$

$$M_{cp} = P_{cp} / \Omega, \qquad (49)$$

где $i(t) = \sqrt{2}I \cos \omega t$ – ток статора.

Значения электродвижущей силы и электромагнитного момента рассматриваемого БВДМ для номинального тока I = 5 A, подсчитанные по формулам (46) и (47), для времени t = 0 в математической программе Mathcad 15, равны соответственно 58,3 В и 6,24 Н·м.

Мгновенные значения результирующей ЭДС и электромагнитного момента рассматриваемого БВДМ, построенные по формулам (46) и (47), показаны на рисунке 21.



Рисунок 21 – Электромагнитный момент (сплошная линия) и результирующая электродвижущая сила обмотки статора (пунктирная линия)

Из рисунки 21 амплитуда переменной составляющей электромагнитного момента, соответственно, равна %:

$$\Delta M = \frac{6,24 - 6,2}{2 \cdot 6,22} 100 = 0,32.$$

Рассмотрим влияние вариации магнитной индукции по высоте обмотки статора δ_{ob} . Для этого разбиваем обмотку статора на 10 слоев, показанных на рисунке 22. Потом суммируем расчетные значения электромагнитного момента и ЭДС для указанных слоёв и сравним результаты с предыдущими значениями.



Рисунок 22 – Разбиваемые слои обмотки статора

Электромагнитный момент и ЭДС десяти слоев обмотки статора представлены на рисунке 23.







В таблице 4 показаны значения электродвижущей силы и электромагнитного момента всех слоев, подсчитанные по формулам (46) и (47) для момента времени *t* = 0.

T	~ 1	р		,	$n \pi \alpha$						
	аблица 4 –	- Pesy	льтипъ	юшие) /(И	элект	помаг	нитные	моменты	споев
	иолици і	105	JIDIMPY	ющие	эдс		JUCKI	pomui	IIIIIIDIC	MONUTIDI	CHOCD

Номер слоя	ЭДС обмотки статора, В	Электромагнитный момент, Н·м
1	6,026	0,663
2	5,974	0,652
3	5,924	0,641

55

Номер слоя	ЭДС обмотки статора, В	Электромагнитный момент, Н·м
4	5,877	0,631
5	5,831	0,622
6	5,788	0,613
7	5,709	0,598
8	5,672	0,592
9	5,639	0,586
10	5,608	0,581
	$\sum \Im \square C = 58,05$	$\sum M = 6,18$

Суммарные значения электромагнитных моментов и ЭДС десяти слоев будут равны 6,18 Н·м, 58,05В. Эти показатели, вычисленные меньше для одномерного характера магнитного поля в немагнитном зазоре, имели значения 6,24 Н·м, 58,3 В. Из результатов исследования можно сказать, что учёт особенностей магнитного поля в промежутке между статорными и роторными ферромагнитными сердечниками БВДМ, вызванными его двухмерным характером, практически не влияет на величины расчётных значений электромагнитного момента и ЭДС обмотки статора макетного образца БВДМ.

2.4 Влияние высоты магнитов на рабочие свойства беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя

Современные высококоэрцитивные постоянные магниты Nd-Fe-B обладают многими преимуществами и находят большое применение в беспазовых вентильных двигателях. В БВДМ при сохранении наружного диаметра ротора будем изменять высоту $h_{\rm M}$ магнитов в промежутке от 5 до

20 мм и рассматривать последовательное изменение магнитной индукции в воздушном зазоре, которая влияет на рабочие свойства беспазового вентильного электродвигателя.

На рисунке 24 показаны кривые индукции магнитного поля по осям *x* и *y* на поверхности магнитов по значениями высоты магнитов рассматриваемого макетного образца БВДМ, вызванные МДС постоянных магнитов по формулам (12), (13).



(a)
$$h_{\rm M} = 5$$
 MM







(B) $h_{\rm M} = 7$ MM





(д) $h_{\rm M} = 9$ мм









(и) *h*_м = 14 мм







(к) $h_{\rm M} = 15$ мм





х, м







(H)
$$h_{\rm M} = 18$$
 MM



(o) $h_{\rm M} = 19$ MM





60

На рисунке 25 и в таблице 5 указаны значения радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре при изменении высоты постоянных магнитов, полученные по формулам (12), (13).

h _{м,} мм	5	6	7	8	9	10	11	11,7
<i>В</i> _у , Тл	0,47	0,51	0,55	0,59	0,61	0,63	0,64	0,65
h _{м,} ММ	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>В</i> _у , Тл	0,64	0,64	0,64	0,64	0,63	0,62	0,6	0,59

Таблица 5 – Значения радиальной индукции магнитного поля при изменении высоты постоянных магнитов



Рисунок 25 – Значения радиальной индукции магнитного поля по оси *у* на поверхности постоянных магнитов при изменении их высоты

Из рисунка 25 видим, что значение индукции в воздушном зазоре между статором и ротором рассматриваемого БВДМ значительно зависит от высоты

постоянного магнита, индукция в воздушном зазоре достигает максимального значения при высоте магнитов $h_{\rm M} = 11,7$ мм. Увеличение магнитной индукции при увеличении высоты постоянных магнитов от 5 до 11,7 мм составляет 38 %. При дальнейшем увеличении значения $h_{\rm M}$ индукция уменьшается.

На рисунке 26 и в таблице 6 приведены значения электромагнитных моментов и ЭДС обмотки статора при изменении высоты постоянных магнитов, полученные по формулам (47) и (46).

Таблица 6 – Значения электромагнитного момента и ЭДС обмотки статора при варьировании высоты постоянных магнитов

<i>h</i> _м , мм	Электромагнитный момент, Н · м	ЭДС обмотки статора, В
5	5,59	50,33
6	6,1	54,61
7	6,42	58,38
8	6,68	61,58
9	6,86	64,01
10	6,96	65,89
11,7	7,01	67,59
13	6,97	67,57
14	6,89	67,23
15	6,79	67,0
16	6,66	66,19
17	6,5	65,03
18	6,35	63,67
19	6,17	62,14
20	5,99	60,46



Рисунок 26 – ЭДС обмотки статора (пунктирная линия) и электромагнитный момент (сплошная линия) при изменении высоты магнитов

С учётом данных таблицы 6 предположим, что при высоте магнита $h_{\rm M} = 11,7$ мм индукция в воздушном зазоре достигает максимального значения 0,65 Тл. При этой индукции, электромагнитный момент и ЭДС обмотки статора, подсчитанные по формулам (47) и (46), будут соответственно равны 7,01 Н·м и 67,59 В.

2.5 Сравнительный анализ КПД и электромагнитных потерь пазового и беспазового магнитоэлектрических вентильных двигателей

Как показано выше, в беспазовых магнитоэлектрических вентильных двигателях нет зубцов на статоре, поэтому в теории полная потеря у БВДМ будет меньше полной потери у ПВДМ при прочих равных условиях. Ниже рассмотрим электромагнитные потери БВДМ и ПВДМ с обычной обмоткой статора.

Магнитные потери. Магнитные потери или потери в стали (*P*_{CT}), возникают в статорах вентильных магнитоэлектрических двигателей. В

роторах и в постоянных магнитах магнитный поток постоянен, поэтому потерями в роторах пренебрегают [34].

Магнитные потери в спинке статора [30]

$$P_{\rm C} = 1.7 \, p_{1/50} \, (\frac{f}{50})^{\beta} B_{\rm C}^2 m_{\rm C}, \tag{50}$$

где f = 50 Гц – частота перемагничивания; β – показатель степени; $P_{1/50}$ – удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл; $B_{\rm C}$ – средняя индукция в спинке статора.

Найти массу стали спинки статора *m*_C (в кг) можно по формуле

$$m_{\rm C} = \pi (D_{HC} - h_C) h_C l_\delta k_c \gamma_c, \qquad (51)$$

где $D_{\rm HC} = 0,1$ м – наружный диаметр статора; $h_{\rm C} = 0,012$ м – высота спинки статора; $K_{\rm C} = 0,97$ – коэффициент заполнения сердечника сталью; $\gamma_{\rm C} = 7,8 \times 10^3$ кг/м³ – удельная масса стали.

В пазовом магнитоэлектрическом вентильном двигателе средняя индукция в спинке статора $B_{\rm C} = 1,63$ Тл [43] и масса стали спинки статора по формуле (51) $m_{\rm C} = 1,75$ кг, поэтому потери в спинке статора по формуле (50) будут составлять, Вт:

$$P_{\rm CII} = 4,4 \times 1,63^2 \times 1,75 = 20,46$$

В беспазовом магнитоэлектрическом вентильном двигателе средняя индукция в спинке статора $B_{\rm C} = 0,43$ Тл [43] и масса стали спинки статора $m_{\rm C} = 1,75$ кг, по формуле (50) потери в спинке статора будут рассчитаны следующим образом, Вт:

$$P_{\rm CE} = 4,4 \times 0,43^2 \times 1,75 = 1,42$$

Магнитные потери в зубцах статора [26]

$$P_3 = 1.7 p_{1/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B_3^2 m_3.$$
(52)

Расчетная масса стали зубцов статора при трапецеидальных пазах

$$m_3 = z b_{3cp} h_z l_\delta \gamma_c k_c, \tag{53}$$

где z = 36 – число зубцов; $b_{3cp} = 2,8$ мм – средняя ширина зубцов; $h_z = 14$ мм;

В ПВДМ средняя индукция в зубцах статора $B_3 = 1,4$ Тл [43], масса стали зубцов статора по формуле (53) $m_3 = 1,5$ кг, поэтому потери в зубцах статора по формуле (52) будут, Вт:

$$P_{3\Pi} = 4,4 \times 1,4^2 \times 1,5 = 12,94$$

Поскольку в БВДМ нет зубцов, поэтому потери в зубцах будут равны нулю.

Электрические потери. Электрические потери, возникающие в обмотке статора, можно рассчитать по формуле:

$$P_{\mathfrak{B}} = mrI^2 \tag{54}$$

В пазовом магнитоэлектрическом вентильном двигателе r = 0,3 Ом, поэтому электрические потери по формуле (54), Вт:

$$P_{3\Pi} = 3 \times 5^2 \times 0.3 = 22.5$$

В беспазовом магнитоэлектрическом вентильном двигателе r = 0,39 Ом, электрические потери по формуле (54) будут равны, Вт:

$$P_{3\mathrm{E}} = 3 \times 5^2 \times 0.39 = 29.75$$

Механические потери. Механические потери ВД, равные сумме потерь в подшипниках и на вентиляцию, можно рассчитать по формуле [26]

$$P_{\text{Mex}} \approx 3,68 \, p (\nu_p \,/\,40)^3 \sqrt{l_1}$$
 (55)

где l_1 – полная длина статора, м; v_p – окружная скорость ротора, м/с

В ПДВМ при расчете по формуле (55) получим, Вт:

$$P_{\text{Mex}\Pi} \approx 0,28$$

В БДВМ при расчете по формуле (55) получим, Вт:

 $P_{\text{Mexb}} \approx 1,34$

Добавочные потери. Приближенно полные добавочные потери для ВД при нагрузке можно определить в размере 0,5 % от подводимой мощности. Добавочные потери для обоих типов ВД будут примерно одинаковыми, и их можно принять равными, Вт

$$P_{\rm Доб} \approx 13$$

Суммарные потери в ПДВМ будут, Вт:

$$\sum P_{\Pi} = P_{C\Pi} + P_{3\Pi} + P_{\Im\Pi} + P_{Mex\Pi} + P_{\Pi o \delta} = 69,18$$
(56)

По аналогии, суммарные потери в БВДМ будут, Вт:

$$\sum P_{\rm b} = P_{\rm Cb} + P_{\rm 3b} + P_{\rm 3b} + P_{\rm Mexb} + P_{\rm dob} = 45,51$$
(57)

Из (56) и (57) видно, что полученное значение потерь в ПВДМ при прочих равных условиях превышает значение потерь в БВДМ в 1,52 раза. Из этого также можно сделать однозначный вывод о более высоком КПД вентильного магнитоэлектрического двигателя в беспазовом исполнении по сравнению с КПД аналогичного двигателя с зубчатым статором.

2.6 Выводы по главе 2

1. Математической основой для аналитического решения задачи Дирихле в немагнитном зазоре БВДМ (воздушный зазор, массив постоянных магнитов ротора, медная обмотка статора) в виде бесконечной горизонтальной полосы с границами из двух параллельных прямых являются комплексные периодические потенциальные функции.

2. Известными скалярными магнитными потенциалами источников магнитного поля – постоянных магнитов ротора и обмотки статора – являются мнимые составляющие комплексных потенциальных функций на границах указанной полосы, представленные тригонометрическими рядами Фурье.

3. Сравнительно большая ширина рассматриваемой полосы вызывает двухмерный характер магнитного поля в ней из-за наличия постоянных магнитов.

4. Макетный образец беспазового вентильного двигателя, изготовленного на базе серийного вентильного двигателя 5ДВМ 115, развивает, как показали тепловые испытания, практически одинаковый с ним электромагнитный момент, если высоту магнитов увеличить на 70 %.

5. При исполнении статора ВД беспазовой обмоткой амплитуда переменной результирующей электромагнитного момента составляет менее 1 % номинального момента. У серийного двигателя при скосе пазов этот показатель составляет обычно менее 5 %.

6. Аналитическое описание магнитного поля в ярмах магнитоэлектрического вентильного двигателя может адекватно производиться с помощью комплексной потенциальной функции, мнимые значения которой на границах с воздушным зазором являются известными скалярными магнитными потенциалами.

7. Выбор значения однородно распределенной в массиве ярма магнитной проницаемости определяется по максимуму магнитной индукции внутри ярма без учета импульсных значений индукции на границах с воздушным зазором.

8. Учёт особенностей магнитного поля в промежутке между статорными и роторными ферромагнитными сердечниками БВД, вызванными его двухмерным характером, практически не влияет на величины расчётных значений электромагнитного момента и ЭДС обмотки статора рассматриваемого макетного образца БВД.

9. При высоте постоянных магнитов 11,7 мм, индукция магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором беспазового вентильного двигателя достигает максимального значения, следовательно, ЭДС обмотки статора и электромагнитный момент имеют максимальные значения.

10. Электромагнитные потери БВДМ при прочих равных условиях меньше электромагнитных потерь ПВДМ, следовательно, коэффициент полезного действия БВДМ больше коэффициента полезного действия аналогичного двигателя с зубчатым статором.

ГЛАВА 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ БЕСПАЗОВОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОМБИНИРОВАННЫМ ПРОВОДОМ

3.1 Комбинированный провод

Для увеличения электромагнитного момента нужно увеличить магнитную проводимость обмоточных проводов БВДМ, целесообразно применить обмоточный провод из меди и железа. Рассмотрим, какие комбинированные проводы наиболее оптимальны для обмоточных проводов в БВДМ.

Магнитный поток легко проходит через железо (ферромагнитный материал) и медь (немагнитный материал) комбинированного провода. Однако, когда процентное содержание железа увеличивается, омическая потеря в катушке якоря на номинальный ток увеличивается, потому что удельное сопротивление железа выше, чем у меди примерно в 5,7 раз. Ниже будем рассматривать два типичных комбинированных проводов, с медной и железной оболочкой снаружи.

На рисунке 27 показаны виды в разрезе типа оболочки железа и основы железа комбинированного провода.



Рисунок 27 – модель комбинированного провода

Диаметр комбинированного провода составляет 1 мм, а толщина изолирующего покрытия вокруг провода равна 0,05 мм. На рисунке 28 показаны изменения магнитного потока в поперечных сечениях комбинированных проводов. Для типа железной оболочки, показаны на рисунке 28, магнитный поток легко протекает через железную часть провода. В комбинированном проводе с отношением железа 36 % на рисунке 28(б), некоторые линии МП проходят через медную часть провода, потому что МП в железе почти насыщена.



Рисунок 28 – магнитный поток в комбинированном проводе

В комбинированном проводе, имеющем отношение железа 64 % (рисунок 28(в)), магнитный поток не проходит через медную части провода, потому что в железной оболочке части МП не насыщено. В комбинированном проводе, имеющем кроме железной основы медную оболочку, магнитный поток в проводе значительно не увеличивается, как показано на рисунках 28(д) и 28(е). Относительная магнитная проницаемость комбинированного провода найдена по формуле [68]

$$\mu_r = \frac{\text{Магнитный поток с комбинированной обмоткой}}{\text{Магнитный поток с медной обмоткой}}$$

Комбинированный провод, содержащий 40% оболочкой железной части поперечного сечения считаться наилучший вариант для применения в

роторах БВДМ. Комбинированный провод с медной оболочкой и железной основной оказывается менее эффективным (рисунок 29).



Рисунок 29 – Удельное сопротивление ρ и относительная магнитная проницаемость μ_r комбинированного провода

3.2 Аналитическая модель магнитного поля в активной зоне БВДМ с комбинированным проводом

При расчёте магнитного поля в немагнитном зазоре в параграфе 2.1 обмоточный слой из комбинированного провода как элемент магнитной цепи заменен эквивалентным медным слоем, имеющим в μ_r раз меньшую толщину по сравнению с комбинированным слоем. В этом случае магнитную проницаемость всей расчётной полосы можно принять равной магнитной проницаемости воздуха, т.е. магнитная среда полосы будет однородной.

Электромагнитные расчёты рассматриваемым методом будут справедливы именно для однородного по магнитной проницаемости немагнитного зазора.

Если принять за эквивалентную толщину $\tilde{\delta}_{ob}$ обмотки с комбинированным проводом

$$\widetilde{\delta}_{o6} = \frac{\delta_{o6}}{\mu_r}, \qquad (58)$$

где δ_{o6} – реальная толщина этой обмотки,

Тогда высота немагнитной полосы у двигателя с комбинированной обмоткой составит

$$\delta_{\rm KII} = \tilde{\delta}_{\rm of} + h_{\rm M} + \delta_{\rm B}, \qquad (59)$$

Где $h_{\rm M}$, $\delta_{\rm B}$ – соответственно высота магнитов и размер воздушного зазора.

При $\mu_r = 3,5$ получим по формулам (58), (59) расчётное значение немагнитного промежутка (ширины бесконечной полосы) $\delta = 10,59$ мм вместо 15,05 мм при медной обмотке.

В соответствии с формулой (12), (13) вместо δ примем δ_{кп} составляющие индукции магнитного поля по осям *x* и *y*, вызванной постоянными магнитами

$$B_{px}(x, y, \vartheta) = \frac{2\mu_0 \alpha I_{\rm M}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta (2n-1)}{sh\alpha (2n-1)\delta_{\rm KII}} \cos \left[\alpha (2n-1)(x-\vartheta)\right] sh\left[\alpha (2n-1)(y-\delta_{\rm KII})\right] (60)$$

$$B_{py}(x, y, \vartheta) = -\frac{2\mu_0 \alpha I_{\rm M}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta_{\rm KII}} \sin[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)]ch[\alpha(2n-1)(y-\delta_{\rm KII})].$$
(61)

где 9 – сдвиг продольной оси фазы *A* статора относительно магнитной оси ротора; **В** – угловой промежуток между краями соседних магнитов разной полярности.

На рисунке 30 показаны кривые магнитной индукции рассматриваемого макетного образца БВДМ с комбинированным проводом, имеющего на роторе высококоэрцитивные постоянные магниты высотой 7,3 мм.



Рисунок 30 – Составляющие индукции магнитного поля по осям у (сплошная линия) и x (пунктирная линия) на поверхности магнитов ($y = h_{_{\rm M}}$), вызванные магнитодвижущей силой магнитов

Рисунок 30 указывает, что увеличение радиальной магнитной индукции на поверхности магнитов БВДМ с комбинированным проводом сравняется с радиальной магнитной индукцией БВДМ с медным проводом составит 40,43 %.

Для комплексного скалярного магнитного потенциала всей обмотки статора в соответствии с формулой (19) будет
$$w_{\text{ctarop}}(x, y) = \left[w_{\cos}(x, y) + w_{\sin}(x, y)\right] = -\frac{\sqrt{2\tilde{m}} w}{\pi p} I \times \left\{ \frac{\sin(\omega t) \frac{k_{w1} \left[\sin\alpha x ch(\alpha y) + j \cos\alpha x sh(\alpha y)\right]}{sh(\alpha \delta_{wn})} - \frac{sh(\alpha \delta_{wn})}{sh(\alpha \delta_{wn})} + \frac{sinh(\alpha \delta_{wn})}{sinh(\alpha \delta_{wn})} + \frac{sinh(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} \left[\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x ch(2\tilde{m}k+1)\alpha y + j \cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x sh(2\tilde{m}k+1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k+1)sinh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ -\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} \left[\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x ch(2\tilde{m}k+1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x sh(2\tilde{m}k+1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k+1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ +\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} \left[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y + j \cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ +\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ -\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ -\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ -\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ -\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ -\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ -\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ -\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha y - j \sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\right]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{wn}} + \left\{ -\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} \left[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x ch(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha x$$

Данную формулу можно записать в коротком виде

$$w_{\text{crarop}}(z) = \left[w_{cos}(z) + w_{sin}(z) \right] = \left[sin(\omega t) \frac{k_{w1}[sin\alpha z]}{sh(\alpha \delta_{\text{KII}})} - cos(\omega t) \frac{k_{w1}[cos\alpha z]}{sh(\alpha \delta_{\text{KII}})} + \right] \\ + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[sin(2\tilde{m}k+1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k+1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_{\text{KII}}} - \right] \\ - cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[cos(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_{\text{KII}}]}{(2\tilde{m}k+1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_{\text{KII}}} + \left\{ sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[sin(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{\text{KII}}} + cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[cos(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{\text{KII}}} + cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[cos(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{\text{KII}}]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_{\text{KII}}} + \right\}$$

На рисунке 31 представлены составляющие скалярного потенциала магнитного поля обмотки статора на внешней поверхности постоянных магнитов макетного образца БВДМ, подсчитанные по выражению (63) для

момента времени t = 0, кривые 1 и 3 – поверхности статора ($y = \delta$), кривые 2 и 4 – поверхности магнитов ($y = h_{M}$).



Рисунок 31 – Составляющие скалярного потенциала магнитного поля по осям *у* (кривые 1 и 2) и *х* (кривые 3 и 4), вызванные магнитодвижущей силой обмотки статора

Рисунок 31 указывает, что радиальные составляющие скалярного магнитного потенциала обмотки статора на поверхности статора не изменились, а увеличение его на поверхности магнитов БВДМ с комбинированным проводом сравнивается с радиальными составляющими скалярного магнитного потенциала БВДМ с медным проводом составляет 63,31 %.

Тогда составляющие индукции магнитного поля по осям *x* и *y*, вызванные током обмотки статора в соответствии с формулами (22) и (23) вместо δ примем δ_{кп} будут иметь вид:

$$B_{cx}(x, y, t) = -\frac{\sqrt{2}\tilde{m}\mu_{0}\alpha}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ sin(\omega t) \frac{k_{w1}[sin\alpha xsh\alpha y]}{sh(\alpha\delta_{\kappa \Pi})} - cos(\omega t) \frac{k_{w1}[cos\alpha xsh\alpha y]}{sh(\alpha\delta_{\kappa \Pi})} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[sin(2\tilde{m}k+1)\alpha xsh(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{\kappa \Pi}} - cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[cos(2\tilde{m}k+1)\alpha xsh(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{\kappa \Pi}} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[sin(2\tilde{m}k-1)\alpha xsh(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{\kappa \Pi}} + cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[cos(2\tilde{m}k-1)\alpha xsh(2\tilde{m}k-1)\alpha xsh(2\tilde{m}k-1)\alpha xsh(2\tilde{m}k-1)\alpha xsh(2\tilde{m}k-1)\alpha} + cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde$$

$$B_{cy}(x, y, t) = \frac{\sqrt{2}\widetilde{m}\mu_{0}\alpha}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ sin(\omega t) \frac{k_{w1}[cos\alpha xch\alpha y]}{sinh(\alpha\delta_{w1})} + cos(\omega t) \frac{k_{w1}[sin\alpha xch\alpha y]}{sinh(\alpha\delta_{w1})} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k+1)}[cos(2\widetilde{m}k+1)\alpha xch(2\widetilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\widetilde{m}k+1)\alpha\delta_{w1}} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k+1)}[sin(2\widetilde{m}k+1)\alpha xch(2\widetilde{m}k+1)\alpha y]}{sh(2\widetilde{m}k+1)\alpha\delta_{w1}} + sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[cos(2\widetilde{m}k-1)\alpha xch(2\widetilde{m}k-1)\alpha y]}{sh(2\widetilde{m}k-1)\alpha\delta_{w1}} - cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[sin(2\widetilde{m}k-1)\alpha xch(2\widetilde{m}k-1)\alpha xch(2\widetilde{m}k-1)\alpha$$

Составляющие индукции магнитного поля на поверхности магнитов рассматриваемого макетного образца БВДМ с комбинированным проводом, произведенные по формулам (64), (65) для момента времени t = 0, представлены на рисунке 32.



Рисунок 32 – Составляющие индукции магнитного поля по осям у (сплошная линия) и x (пунктирная линия) на поверхности постоянных магнитов ($y = h_{M}$), вызванные током обмотки

статора

Из рисунка 32 видим, что составляющие индукции магнитного поля на поверхности постоянных магнитов БВДМ с комбинированным проводом, вызванные током обмотки статора, больше в 2 раза по сравнению с составляющими магнитной индукции БВДМ с медным проводом.

3.3 Аналитическая модель магнитного поля в ярмовых участках БВДМ с комбинированным проводом

3.3.1 Магнитное поле в ярме статора

Источник поля – МДС обмотки статора. В соответствии с формулой (25) вместо δ примем δ_{кп}. Составляющие магнитной индукции по осям *x* и *y* в ярме статора

$${}^{c}B^{\bullet}_{cx}(x,y) = -\frac{\sqrt{2}\widetilde{m}\mu_{0}\mu_{r1}\alpha}{\pi} \frac{w}{p}I \times \left\{ k_{cx}\sin(\omega t)\frac{k_{wl}[ch\alpha(y-\delta_{1})\sin\alpha x]}{sh(\alpha\delta_{1})} - k_{cx}\cos(\omega t)\frac{k_{wl}[ch\alpha(y-\delta_{1})\cos\alpha x]}{sh(\alpha\delta_{1})} + k_{cx2}(k)\sin(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\widetilde{m}k+1)}[ch(2\widetilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})\sin(2\widetilde{m}k+1)\alpha x]}{sh(2\widetilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} - k_{x2}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\widetilde{m}k+1)}[ch(2\widetilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})\cos(2\widetilde{m}k+1)\alpha x]}{sh(2\widetilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} + k_{cx1}(k)\sin(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[ch(2\widetilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})\sin(2\widetilde{m}k-1)\alpha x]}{sh(2\widetilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} + k_{cx1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[ch(2\widetilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})\cos(2\widetilde{m}k-1)\alpha x]}{sh(2\widetilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} + k_{cx1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\widetilde{m}k-1)}[ch(2\widetilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})\cos($$

где

$$k_{cx} = \frac{sh\alpha\delta_1}{ch\alpha\delta_1}; \ k_{cx1}(k) = \frac{sh(k-1)\alpha\delta_1}{ch(k-1)\alpha\delta_1}; \ k_{cx2}(k) = \frac{sh(k+1)\alpha\delta_1}{ch(k+1)\alpha\delta_1}.$$
 (67)

– коэффициенты приведения.

$${}^{c}B^{\bullet}_{1cy}(x,y) = \frac{\sqrt{2}\tilde{m}\mu_{0}\alpha}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ k_{cy}\sin(\omega t) \frac{k_{w1}[sh\alpha(y-\delta_{1})\cos\alpha x]}{sh(\alpha\delta_{1})} + k_{cy}\cos(\omega t) \frac{k_{w1}[sh\alpha(y-\delta_{1})\sin\alpha x]}{sh(\alpha\delta_{1})} + k_{cy2}(k)\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[sh(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} + k_{cy2}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[sh(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{1})\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{1}} + k_{cy1}(k)\sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[sh(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} - k_{cy1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[sh(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{1})\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{1}} - k_{cy1}(k)\cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2$$

где

$$k_{cy} = -\frac{ch\alpha\delta_{\rm KII}}{sh\alpha\delta_{\rm KII}}; \ k_{cy1}(k) = -\frac{ch(k-1)\alpha\delta_{\rm KII}}{sh(k-1)\alpha\delta_{\rm KII}}; \ k_{cy2}(k) = -\frac{ch(k+1)\alpha\delta_{\rm KII}}{sh(k+1)\alpha\delta_{\rm KII}}.$$
(69)

– коэффициенты приведения.

Рисунки 33 и 34 иллюстрируют идентичный импульсный характер изменения индукций на границе двух полос в пределах магнитного периода по формулам (28) и (66), (30) и (68). Импульсный характер этих кривых объясняется тем, что они получились в результате дифференцирования ступенчатой кривой МДС обмотки статора.



Рисунок 33 – Сопряжение со скачкообразным разрывом тангенциальных составляющих магнитной индукции от тока статора на границе воздушного зазора и ярма статора



Рисунок 34 – Сопряжение радиальных составляющих магнитной индукции от тока статора на границе воздушного зазора и ярма статора

По формулам (66), (68) построены кривые составляющих магнитной индукции внутри и на наружной границе ярма статора ($y = \delta_1$), показанные на рисунке 35.



Рисунка 35 – Радиальные (кривые 1, 2, 3) и тангенциальные (кривая 4) составляющие магнитной индукции в ярме статора от тока статорной обмотки, построенные для линий со значениями координаты *у* соответственно: 0,2 δ₁; 0,6 δ₁; δ₁; δ₁

Из рисунков 33 и 34 видим, что радиальные и тангенциальные магнитные индукции от тока на границе воздушного зазора и ярма статора БВДМ с комбинированным проводом сравняются с радиальными и тангенциальными магнитными индукциями БВДМ с медным проводом практически не изменятся. Увеличение радиальных составляющих магнитной индукции в ярме статора БВДМ составляет 14,29 %.

Источник поля – магниты на роторе. В соответствии с формулой (33) и (34) вместо δ примем δ_{кп}. Составляющие магнитной индукции по осям *x* и *y* в ярме статора будут иметь вид

$${}^{p}B^{\bullet}_{cx}(x, y, \vartheta) = \frac{2\mu_{0}\mu_{r1}\alpha I_{M}}{\pi} \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta_{1}} k_{cx}(n)\cos[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)]ch[\alpha(2n-1)(y-\delta_{1})],$$
(70)

$${}^{p}B^{\bullet}{}_{cy}(x,y,\vartheta) = -\frac{2\mu_{0}\alpha I_{M}}{\pi} \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta_{1}} k_{cy}(n) \sin[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] sh[\alpha(2n-1)(y-\delta_{1})],$$
(71)

где

$$k_{cx}(n) = \frac{sh[(2n-1)\alpha\delta_{1}]}{sh[(2n-1)\alpha\delta_{\kappa\Pi}]} \frac{1}{ch[(2n-1)\alpha(\delta_{\kappa\Pi} - \delta_{1})]}.$$

$$k_{cy}(n) = \frac{sh[(2n-1)\alpha\delta_{1}]}{sh[(2n-1)\alpha\delta_{\kappa\Pi}]} \frac{1}{sh[(2n-1)\alpha(\delta_{\kappa\Pi} - \delta_{1})]}.$$
(72)

– коэффициенты приведения.

На рисунках 36 и 37 показаны граничные значения магнитной индукции на периоде магнитного поля, построенные по формулам (33) и (70), (34) и (71) для положения ротора $\vartheta = \tau/2$.



Рисунок 36 – Изменение тангенциальных составляющих магнитной индукции, вызванные магнитами ротора, на границе воздушного зазора

и ярма статора с $\mu_{r1} = 10$ при $\vartheta = \tau/2$



Рисунок 37 – Изменение радиальных составляющих магнитной индукции, вызванные магнитами ротора, на границе воздушного зазора

и ярма статора при $\vartheta = \tau / 2$

На рисунках 38 и 39 показаны кривые результирующих соответственно радиальных и тангенциальных составляющих магнитных индукций для внутренних точек ярма статора, вызванных токами статора и магнитов ротора при $\vartheta = \tau/2$.



Рисунок 38 – Кривые результирующих радиальных магнитных индукций в ярме статора на линиях, находящихся на расстоянии от внутреннего края ярма: сплошная линия – 0,2 δ₁; точечная линия – 0,6 δ₁; пунктирная линия – δ₁



Рисунок 39 – Кривые результирующих тангенциальных магнитных индукций в ярме статора с μ_{r1} = 10 на линиях, находящихся на расстоянии от внутреннего края ярма: сплошная линия – 0,2 δ₁; точечная линия– 0,4 δ₁; пунктирная линия – δ₁ (δ₁ – высота ярма статора)

Из рисунков 36 и 37 видим, что увеличение радиальных и тангенциальных составляющих магнитной индукции, вызванных магнитами

ротора, на границе воздушного зазора и ярма статора БВДМ с комбинированным проводом сравняются с БВДМ с медным проводом составят соответственно 51,56 и 82,3 %.

Из рисунков 38 и 39 видим, что увеличение радиальных и тангенциальных составляющих магнитной индукции, вызванных магнитами ротора, на ярме статор БВДМ с комбинированным проводом сравняются с БВДМ с медным проводом составят соответственно 150,58 и 111,36 %.

3.3.2 Магнитное поле в ярме ротора

Источник поля – МДС обмотки статора. В соответствии с формулам (36) и (38) вместо δ примем $\delta_{\kappa n}$. Тангенциальное магнитное поле в ярмовой полосе ротора шириной δ_2 и с относительной магнитной проницаемостью μ_{r2} , вызванное током статора, будет описываться формулой

$${}^{c}B^{\bullet}_{px}(x,y) = -\frac{\sqrt{2\tilde{m}\mu_{0}\mu_{r2}\alpha}}{\pi} \frac{w}{p}I \times \left\{ k_{px}\sin(\omega t)\frac{k_{w1}[ch\alpha(y-\delta_{2})\sin\alpha x]}{sh(\alpha\delta_{2})} - k_{px}\cos(\omega t)\frac{k_{w1}[ch\alpha(y-\delta_{2})\cos\alpha x]}{sh(\alpha\delta_{2})} + k_{px2}(k)\sin(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[ch(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{2})\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{2}} - k_{px2}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[ch(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_{2})\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{2}} + k_{px1}(k)\sin(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[ch(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{2})\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{px1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[ch(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{2})\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{px1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w1}(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_{2})\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{px1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w1}(2\tilde{m}k-1)\alpha}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{px1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w1}(2\tilde{m}k-1)\alpha}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{px1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w1}(2\tilde{m}k-1)\alpha}{s$$

$$\text{где } k_{px} = \frac{sh(\alpha\delta_2)}{sh(\alpha\delta_{\text{кп}})}; k_{px1}(k) = \frac{sh[\alpha\delta_2(2\tilde{m}k-1)]}{sh[\alpha\delta_{\text{кп}}(2\tilde{m}k-1)]}; k_{px2}(k) = \frac{sh[\alpha\delta_2(2\tilde{m}k+1)]}{sh[\alpha\delta_{\text{кп}}(2\tilde{m}k+1)]}.$$
(74)

коэффициенты приведения.

Для радиальной составляющей магнитной индукции в ярме ротора будем иметь

$${}^{c}B^{\bullet}_{py}(x,y) = -\frac{\sqrt{2\tilde{m}\mu_{0}\mu_{r2}\alpha}}{\pi} \frac{w}{p}I \times \left\{ k_{py}\sin(\omega t)\frac{k_{w1}[sh\alpha y\cos\alpha x]}{sh(\alpha\delta_{2})} - k_{py}\cos(\omega t)\frac{k_{w1}[sh\alpha y\sin\alpha x]}{sh(\alpha\delta_{2})} + k_{py2}(k)\sin(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[sh(2\tilde{m}k+1)\alpha y\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{2}} - k_{py2}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[sh(2\tilde{m}k+1)\alpha y\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_{2}} + k_{py1}(k)\sin(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[sh(2\tilde{m}k-1)\alpha y\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{py1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[sh(2\tilde{m}k-1)\alpha x]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{w1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w1}(k)}{sk(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}}} + k_{w1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w1}(k)}{sk(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{w1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w1}(k)}{sk(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{w1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w1}(k)}{sk(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}}} + k_{w1}(k)\cos(\omega t)\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k_{w1}(k)}{sk(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_{2}} + k_{w1}($$

где

$$k_{py} = \frac{1}{sh(\alpha\delta_{_{\rm KII}})}; k_{py1}(k) = \frac{1}{sh[\alpha\delta_{_{\rm KII}}(2\tilde{m}k-1)]}; k_{py2}(k) = \frac{1}{sh[\alpha\delta_{_{\rm KII}}(2\tilde{m}k+1)]}, - (76)$$

коэффициенты приведения.



Рисунок 40 – Тангенциальные составляющие магнитной индукции на границе воздушного зазора и ярма ротора с $\mu_{r2} = 5$, вызванные током статора



Рисунок 41 – Радиальные составляющие магнитной индукции, вызванные током статора, на границе воздушного зазора и ярма ротора

Из рисунков 40 и 41 видим, что увеличение радиальных и тангенциальных составляющих магнитной индукции, вызванных током статора, на границе воздушного зазора и ярма ротора БВДМ с комбинированным проводом сравняются с БВДМ с медным проводом и составят 65 %.

Источник поля – магниты ротора. В БВДМ с комбинированным проводом в полосе ярма ротора магниты располагаются на верхней границе. Этот источник создаёт в ярме ротора магнитное поле, которое будет описываться уравнениями

$${}^{p}B^{\bullet}{}_{px}(x, y, \vartheta) = \frac{2\mu_{0}\mu_{r2}\alpha I_{M}}{\pi} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta_{1}} k_{px}(n) \cos[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)]ch[\alpha(2n-1)y],$$

$${}^{p}B^{\bullet}{}_{py}(x, y, \vartheta) = -\frac{2\mu_{0}\alpha I_{M}}{\pi} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta_{1}} k_{py}(n) \sin[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)]sh[\alpha(2n-1)y],$$
(78)

где

$$k_{px}(n) = -\frac{sh[(2n-1)\alpha\delta_2]}{ch[(2n-1)\alpha\delta_2]}; \ k_{py}(n) = \frac{ch[(2n-1)\alpha\delta_{\kappa\Pi}]}{sh[(2n-1)\alpha\delta_{\kappa\Pi}]}.$$
 (79)

– коэффициент приведения.

Результирующие значения магнитных индукций в ярме ротора, обусловленные магнитами на роторе и токами обмотки статора, показаны на рисунках 42 и 43.



Рисунок 42 – Распределение в ярме ротора с $\mu_{r2} = 5$ результирующей тангенциальной индукции на различных уровнях от внутренней поверхности ярма: сплошная кривая – y = 0; точечная кривая – $y = 0.4\delta_2$; пунктирная кривая – $y = 0.6\delta_2$



Рисунок 43 – Распределение в ярме ротора результирующей радиальной индукции на различных уровнях от внутренней поверхности ярма: сплошная кривая – y = 0; точечная кривая – y = 0,5δ₂; пунктирная кривая – y = 0,9δ₂

Из рисунков 42 и 43 видим, что увеличение результирующей радиальной магнитной индукции на различных уровнях от внутренней поверхности ярма ротора БВДМ с комбинированным проводом больше результирующей радиальной магнитной индукции БВДМ с медным проводом.

3.4 ЭДС обмотки статора и момент БВДМ с комбинированным проводом

По формулам (12) и (13) будем принимать $\delta_{\kappa n}$ вместо δ . Результирующие индукции магнитного поля на поверхности постоянных магнитов рассматриваемого макетного образца БВДМ для момента времени t = 0 построены на рисунке 44.



Рисунок 44 – Результирующие индукции магнитного поля в воздушном зазоре по осям у (сплошная линия) и x (пунктирная линия) на поверхности постоянных магнитов Значения электродвижущей силы и электромагнитного момента рассматриваемого БВДМ для номинального тока I = 5 А, подсчитанные по выражению (46), для времени t = 0 и выражению (47) в математической программе Mathcad 15 (рисунки 45), равны 83,05 В и 8,95 Н·м.



Рисунок 45 – Электромагнитный момент (сплошная линия) и результирующая электродвижущая сила обмотки статора (пунктирная линия)

Из рисунка 45 амплитуда переменной составляющей электромагнитного момента, соответственно, равна %:

$$\Delta M = \frac{9,006 - 8,9}{2 \cdot 8,95} 100 = 0,59.$$

Рассмотрим влияние вариации магнитной индукции по высоте обмотки статора δ_{ob} . Для этого тоже разбиваем обмотку статора из комбинированного провода на 3 слоя (рисунок 46), потом суммируем расчетные значения электромагнитного момента и ЭДС для указанных слоёв и сравним результаты с предыдущими значениям.



Рисунок 46 – Разбиваемые слои обмотки статора

Рассмотрим электромагнитный момент и ЭДС первого слоя обмотки статора на рисунке 47.



Рисунок 47 – Электромагнитный момент (сплошная линия) и результирующая электродвижущая сила обмотки статора (пунктирная линия) первого слоя

Для первого слоя значения электродвижущей силы и электромагнитного момента рассматриваемого БВДМ для номинального тока I = 5 A, подсчитанные по формуле (46) для времени t = 0 и формуле (47) в математической программе Mathcad 15, равны соответственно 27,612 B и 2,978 H·м. Аналогичные кривые для второго слоя обмотки статора показаны на рисунке 48.



Рисунок 48 – Электромагнитный момент (сплошная линия) и результирующая электродвижущая сила обмотки статора (пунктирная линия) второго слоя

Аналогично, для второго слоя значения ЭДС и электромагнитного момента рассматриваемого БВДМ равны соответственно 27,549 В и 2,958 Н·м.

Кривые электромагнитного момента и ЭДС третьего слоя обмотки статора показаны на рисунке 49.



Рисунок 49 – Электромагнитный момент (сплошная линия) и результирующая электродвижущая сила обмотки статора (пунктирная линия) третьего слоя

Как выше подсчитано, для третьего слоя значения ЭДС и электромагнитного момента рассматриваемого БВДМ, равны соответственно 27,494 В и 2,942 Н·м.

Суммарные значения электромагнитных моментов и ЭДС трех слоев будут равны 8,88 Н·м, 82,657 В. Эти показатели, вычисленные выше для одномерного характера магнитного поля в немагнитном зазоре, имели значения 8,95 Н·м, 83,05 В.

Электромагнитный момент беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя с комбинированной обмоткой при прочих равных условиях будет не меньше электромагнитного момента аналогичного двигателя с зубчатым статором. В рассмотренном примере этот перевес составит 8,95/7 = 1,28 раза.

3.5 Влияние высоты магнитов на рабочие свойства БВДМ с комбинированным проводом

В этом параграфе рассмотрим, при какой высоте магнитов ЭДС фазы обмотки статора и электромагнитного момента достигают максимальных значений. При сохранении диаметра ротора будем изменять высоту $h_{\rm M}$ магнитов в промежутке от 5 до 20 мм и рассматривать последовательное изменение магнитной индукции в воздушном зазоре, которая влияет на рабочие свойства БВДМ с комбинированным проводом.

На рисунке 50 и в таблице 7 указаны значения радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре при изменении высоты постоянных магнитов, полученные по формулам (60), (13).

h _{м,} мм	5	6	7	8	9	9,9	11	12
<i>В</i> _у , Тл	0,693	0,74	0,776	0,803	0,823	0,842	0,843	0,84
h _{м,} мм	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>В</i> _у , Тл	0,84	0,833	0,822	0,808	0,792	0,774	0,754	0,733

Таблица 7 – Значения радиальной магнитной индукции при изменении высоты постоянных магнитов



Рисунок 50 – Значения радиальной магнитной индукции по оси *у* на поверхности постоянных магнитов при изменении высоты магнитов

Из рисунка 50 видим, что значение индукции в воздушном зазоре между статором и ротором рассматриваемого БВДМ значительно зависит от высоты постоянных магнитов, индукция в воздушном зазоре достигает максимального значения при высоте магнитов $h_{\rm M} = 11$ мм. Увеличение магнитной индукции при увеличении высоты постоянных магнитов от 5 до 11 мм составляет 21,65 %. При дальнейшем увеличении значения $h_{\rm M}$ индукция уменьшается.

На рисунке 51 и в таблице 8 приведены значения электромагнитных моментов и ЭДС обмотки статора при изменении высоты постоянных магнитов, полученные по формулам (47) и (46).

Таблица 8 – Значения электромагнитного момента и ЭДС обмотки статора при варьировании высоты постоянных магнитов

$h_{\scriptscriptstyle \mathrm{M}},$ мм	Электромагнитный момент, Н м	ЭДС обмотки статора, В
5	8,261	74,01
6	8,671	78,611

$h_{\scriptscriptstyle \mathrm{M},}$ мм	Электромагнитный момент, Н · м	ЭДС обмотки статора, В
7	8,945	82,172
8	9,114	84,794
9	9,199	86,598
10	9,216	87,692
11	9,217	88,167
12	9,123	88,107
13	8,974	87,582
14	8,822	86,657
15	8,644	85,39
16	8,444	83,834
17	8,228	82,307
18	7,998	80,04
19	7,757	77,883
20	7,509	75,599



Рисунок 51 – Значения ЭДС обмотки статора (пунктирная линия) и электромагнитного момента (сплошная линия) при изменении высоты магнитов

Предполагая (с учётом таблицы 8), что при высоте магнита $h_{\rm M} = 11$ мм индукция в воздушном зазоре достигает максимального значения 0,843 Тл. При этому значению индукции, электромагнитный момент и ЭДС обмотки статора БВД по формулам (47) и (46) будут соответственно равны 9,217 Н·м и 88,167 В.

При изменении высоты магнитов в промежутке с 7 до 13 мм электромагнитный момент БВДМ мало изменяется (около 9 $H \cdot M$), если выбираем высоту магнитов $h_M = 7$ мм у двигателя практически такой же момент, но дешевле и меньше по габаритам.

3.6 Электромагнитные потери и КПД беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя с комбинированным проводом

Магнитные, механические и добавочные потери БВДМ с комбинированным проводом будут такие же, как у БВДМ с медным проводом. Электрические потери будут больше из-за комбинированного провода, имеющего большое активное сопротивление сравнится с медным проводом, в ожидании суммарные потери БВДМ с комбинированной обмоткой меньше потерь в ПВДМ с медной обмоткой при прочих равных условиях, следовательно КПД у БВДМ с комбинированной обмоткой больше КПД у ПВДМ.

3.7 Выводы по главе 3

1. Комбинированный провод, содержащий 40% оболочкой железной части поперечного сечения окажется наилучший вариант для применения в

роторах БВДМ. Комбинированный провод с медной оболочкой и железной основой оказывается менее эффективным

2. Исследования показывают, что индукция в активной зоне у БВДМ с комбинированным проводом больше индукции в этой области у БВДМ с медным проводом.

3. Учёт особенностей магнитного поля в промежутке между статорными и роторными ферромагнитными сердечниками БВД, вызванными его двухмерным характером, практически не влияет на величины расчётных значений электромагнитного момента и ЭДС обмотки статора макетного образца БВД с комбинированным проводом.

4. Электромагнитный момент вентильного двигателя с комбинированной обмоткой при прочих равных условиях может быть в 1,5 раза больше аналогичного момента вентильного двигателя с медной обмоткой.

5. Электромагнитный момент беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя с комбинированной обмоткой при прочих равных условиях будет не меньше электромагнитного момента аналогичного двигателя с зубчатым статором. В рассмотренном примере этот перевес составит 8,95/7 = 1,28 раза.

6. При высоте постоянных магнитов 11 мм индукция магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором беспазового вентильного двигателя достигает максимального значения, следовательно, ЭДС обмотки статора и электромагнитный момент имеют максимальные значения. При высоте магнитов $h_{\rm M} = 7$ мм можно получить двигатель с таким же максимальным моментом (9 Н·м), но дешевле и меньше по габаритам.

7. При прочих равных условиях КПД беспазового вентильного магнитоэлектрического двигателя с комбинированным проводом может быть выше КПД пазового вентильного магнитоэлектрического двигателя с медным проводом.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ БВДМ С МЕДНЫМ ПРОВОДОМ

4.1 Первое экспериментальное исследование

1 Цель испытаний

Целью испытания является определение параметров беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя.

2 Объект испытаний

Беспазовый двигатель БВДМ.

3 Место и время проведения испытаний

Испытания проводились в ИЦ ЗАО «ЧЭАЗ» 05.07.2017 – 06.07.2017.

4 Программа и методика испытаний

Испытания беспазового двигателя БВДМ проводились в соответствии с 029 – 00213703 – 98.

5 Результат испытаний

Результаты испытаний приведены ниже.

Определение длительного допустимого тока I_{do} и длительного момента M_{do} при неподвижном роторе при подаче постоянного тока на две фазы обмотки статора.

Контролируемые параметры: момент и ток в холодном и горячем состоянии, перегрев обмотки статора.

Результаты приведены в таблицах 9 – 12.

Таблица 9 – Значения длительного допустимого тока I_{do}

и длительного момента M_{do} в холодном состоянии

I_{do}, A	4,8	5
$M_{do}, \mathrm{H} \cdot \mathrm{m}$	5,75	6,25

и длительного момента <i>М</i> _{do} в горячем состоянии						
I_{do},A	4,8	5				
$M_{do},\mathrm{H}^{\cdot}\mathrm{M}$	5,25	5,75				

Таблица 10 – Значения длительного допустимого тока *I*_{do} и длительного момента *M*_{do} в горячем состоянии

N⁰	Время, ч:мин	$t_1, °C$	<i>R</i> , Ом	<i>R</i> _{<i>x</i>} , Ом	t₀,°C
1	08:15	23	3,184		
2	08:45	41,7	3,685		
3	09:15	49,5	3,826		
4	09:45	55,4	3,950		
5	10:15	59,1	4,041		
6	10:45	67,1	4,109	3,206	23
7	11:15	66,9	4,146		
8	11:45	67,5	4,179		
9	12:15	68,5	4,198		
10	12:45	69,5	4,218		
11	13:15	70,3	4,231		
12	13:45	85,74	4,238		
13	14:05	89,23	4,281		
14	14:25	90,83	4,301		
15	14:35	91,51	4,309		
16	15:05	93,06	4,328		

Таблица 11 – Измерения при I_{do} = 4,8 А

Принятые обозначения в таблице 11:

- t_1 измеренная температура статора, °C
- *R* измеренное сопротивление статорной обмотки.
- *R_x* сопротивление обмотки статора в холодном состоянии при температуре окружающей среды.
- *t*_o температура окружающей среды.

Номер	Время, ч:мин	<i>t</i> ₁ , °C	<i>R</i> , Ом	Коэффициент изменения температуры, %
1	9:25	81,88	4,188	6,6
2	9:55	87,28	4,234	5,4
3	10:25	92,51	4,319	6
4	10:55	95,94	4,361	3,7
5	11:25	98,39	4,391	2,55
6	11:55	100,35	4,415	2

Таблица 12 – Измерения при *I*_{do} = 5A

6 Определение ЭДС холостого хода

Результат испытаний в холодном состоянии приведен в таблицах 13 и 14

Таблица 13 – Результат испытаний в холодном состоянии

Скорость вращения ротора, об/мин	500	1000	2000	3000
ЭДС, В	47,17	94,34	188,67	283

Таблица 14 – Параметры двигателя БВДМ

$M_{do}, \mathrm{H} \cdot \mathrm{m}$	<i>n_{max},</i> об/мин	<i>U</i> , B	I_{do}, A	Е, В	<i>M_{max}</i> , Н·м, не менее
6,25	3000	520	5,0	250	$5 M_{do}$

Принятые обозначения в таблице 14:

- -

n_{max} – максимальная частота (скорость) вращения ротора;

Е – линейная электродвижущая сила (ЭДС) обмотки двигателя при максимальной частоте вращения (эффективное значение);

M_{max} – кратковременный (длительностью действия не более 1 с) перегрузочный момент.

Примечание: Выявлен глухой короткий шум при вращении ротора. Предполагаемый источник шума – появление механического контакта ротора с статорной обмоткой при повороте вала на 1/5 оборота.

Заключение: Полученные параметры двигателя БВДМ приведены в таблице 14. Для дальнейших работ по испытанию двигателя ДВБ необходимо уменьшить диаметр ротора на 0,5 мм.

4.2 Второе экспериментальное исследование

1 Цель испытаний

Целью испытания является определение параметров макетного образца беспазового двигателя БВДМ.

2 Объект испытаний

Макетный образец беспазового двигателя БВДМ.

3 Место и время проведения испытаний

Испытания проводились в ИЦ ЗАО «ЧЭАЗ» 05.10.2017 – 11.10.2017

4 Программа и методика испытаний

Испытания макетного образца беспазового двигателя ДВБ проводились согласно программе и методике исследовательских испытаний – «Разработка опытного образца беспазового электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов».

5 Испытания на нагревание

Методика: п.7.10 программы и методики исследовательских испытаний.

Условия проведения испытаний:

Выдержать двигатель не менее 8 ч в нормальных климатических условиях.

Контролируемые параметры: сопротивление обмотки, температура.

Принятые обозначения:

- ДQ превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, °С.
- *R_x* сопротивление обмотки статора в холодном состоянии при температуре окружающей среды.
- *R* сопротивление статорной обмотки.
- *t*_o температура окружающей среды.
- *n*max максимальная частота вращения ротора.
- *M*_{do} длительно допустимый момент нагрузки.

5.1 Испытания двигателя при скорости 1,0 *п_{max}* (3000 об/мин) и при

$M_{do} = 4,2 \text{ H} \cdot \text{M}$

Результаты испытаний двигателя при скорости 1,0 n_{max} (3000 об/мин) и при $M_{do} = 4,2$ Н·м представлены в таблице 15.

Номер	Время, ч:мин	<i>∆Q</i> , °C	<i>R</i> , Ом	<i>R</i> _{<i>x</i>} , Ом	t₀, °C
1	13:45	46,01	3,68		
2	14:15	75,86	4,05		
3	14:45	87,16	4,19	3,11	16,4
4	15:15	94,42	4,28		
5	15:45	96,84	4,31		
6	16:15	98,46	4,33		
7	16:45	99,43	4,34		

Таблица 15 – Измерения при $M_{do} = 4,2$ Н·м

5.2 Испытания двигателя при скорости 0,5 *n_{max}* (1500 об/мин) и при $M_{do} = 5 \text{ H} \cdot \text{м}$

Результаты испытаний двигателя при скорости 0,5 n_{max} (1500 об/мин) и при $M_{do} = 5$ Н·м представлены в таблице 16.

Номер	Время, ч:мин	<i>∆Q</i> , °C	<i>R</i> , Ом	<i>R</i> _{<i>x</i>} , Ом	t₀, °C
1	08:25	59,23	3,83		
2	08:55	79,47	4,08		
3	09:25	87,06	4,17	3,1	16,4
4	09:55	95,67	4,25		
5	10:25	100,83	4,34		
6	10:55	103,84	4,38		
7	11:25	105,83	4,41		
8	11:55	106,33	4,43		

Таблица 16 – Измерения при M_{do} = 5 Н·м

5.3 Испытания двигателя при скорости 0,25 *n_{max}* (750 об/мин) и при $M_{do} = 5,8$ Н·м

Результаты испытаний двигателя при скорости 0,25 *n_{max}* (750 об/мин) и при *M_{do}* = 5,8 Н·м представлены в таблице 17.

Номер	Время, ч:мин	<i>∆Q</i> ,°C	<i>R</i> ,Ом	<i>R</i> _{<i>x</i>} ,Ом	$t_o,^{\circ}\mathrm{C}$
1	08:45	53,47	3,77		
2	09:15	73,74	4,02		
3	09:45	81,02	4,11	3,11	17
4	10:15	89,13	4,21		
5	10:45	94,80	4,28		
6	11:15	97,23	4,31		
7	11:45	99,67	4,34		
8	12:15	100,48	4,35		

	Габлица 1	7 – Изме	ерения п	ри <i>M_{do} =</i>	= 5,8	Н∙м
--	-----------	----------	----------	----------------------------	-------	-----

5.4 Испытания двигателя в генераторном режиме на холостом ходу при вращении ротора 3000 об/мин

Результаты испытаний двигателя в генераторном режиме на холостом ходу при вращении ротора 3000 об/мин представлены в таблице 18.

Номер	Время, ч:мин	<i>T₀</i> , °C
1	08:45	41,7
2	09:15	44,8
3	09:45	51,0

Таблица 18 – Измерения в генераторном режиме

Номер	Время, ч:мин	T_o , °C
4	10:15	52,9
5	10:45	54,1
6	11:15	54,3

Принятые обозначения в таблице 18:

*Т*_о – измеренная температура корпуса двигателя.

5.5 Испытания двигателя без нагрузки при вращении ротора 3000 об/мин.

Результаты испытаний двигателя без нагрузки при вращении ротора 3000 об/мин представлены в таблице 19.

Номер	Время, ч:мин	<i>∆Q</i> , °C	<i>R</i> , Ом	<i>Rx</i> , Ом	t₀, °C
1	14:30	60,67	3,87		
2	15:00	81,16	4,12	2.12	21.6
3	15:30	94,28	4,28	3,13	21,6
4	16:00	99,94	4,35		
5	16:30	103,22	4,39		
6	17:00	104,94	4,41		

Таблица 19 – Измерения в двигательном режиме

6 Показания индуктивности статорной обмотки двигателя

Показания индуктивности статорной обмотки двигателя представлены в таблице 20.

Наименование	Значения
Индуктивность L _{min} , Гн	4,77
Индуктивность L _{max} , Гн	4,96

Таблица 20 – Измерения индуктивности

Из тепловых испытаний, результаты БВДМ приведены в таблице 21.

	ПВДМ				БВ,	ДM	
<i>п</i> , об/мин	0	3000	4500	0	750	1500	3000
<i>М</i> , Н·м	7,0	2,33	0	6,25	5,8	5	4,2

Таблица 21 – Результаты тепловых испытаний ВД

В линейном приближении опытные данные могут быть представлены опытная кривая из опытных точек (рисунок 52) и двух пересекающихся прямых (рисунок 53) с координатами точки пересечения: M = 5,66 Hm; n = 860 об/мин.



Рисунок 52 – Экспериментальные данные беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя



Рисунок 53 – Экспериментальные данные ПВДМ (кривая 1)

и БВДМ (кривая 2)

4.3 Выводы по главе 4

1. При скорости вращения ротора вентильного двигателя больше 860 об/мин наиболее оптимальным применением будет беспазовый магнитоэлектрический вентильный двигатель с медными обмотками.

2. Максимальная скорость вращения ротора беспазового вентильного магнитоэлектрического двигателя может достигать до 8500 об/мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлена, теоретически и практически обоснована математическая модель в полевой аналитической форме беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя (БВДМ).

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований получен ряд научных и практических результатов, позволяющих оценить функциональные свойства БВДМ и сравнить их со свойствами аналогичных двигателей пазового исполнения.

Ha разработанной базе математической модели возможно проектирование БВДМ с целью их внедрения в отраслях промышленности, БВДМ студентами учебной транспорта И изучение В дисциплине «Электрические машины».

Основные выводы и результаты работы:

1. Предложена полевая аналитическая модель для расчета магнитных полей в немагнитном зазоре и ярмовых участках БВДМ;

2. На базе полевой аналитической модели БВДМ получены выражения для расчёта электромагнитного момента и электродвижущих сил в фазах обмотки статора, наведенных результирующим магнитным потоком в воздушном зазоре;

3. На основе полевой аналитической модели проведено исследование влияния высоты магнитов на рабочие свойства БВДМ, которое позволяет выбрать этот параметр магнита для требуемых применений БВДМ;

4. Предложены конструктивные исполнения беспазовых магнитоэлектрических вентильных двигателей, позволяющие усовершенствовать технологический процесс их изготовления;

5. Показано, что электромагнитный момент БВДМ с комбинированной обмоткой при прочих равных условиях будет не меньше

106

электромагнитного момента аналогичного двигателя с зубчатым статором. В рассмотренном примере это превышение составит 1,28 раз;

6. Проведен сравнительный анализ электромагнитных потерь и КПД пазового и беспазового магнитоэлектрических вентильных двигателей с медной обмоткой. Найдено, что КПД БВДМ с комбинированной обмоткой будет больше КПД аналогичного ВД с медной обмоткой в зубчатом исполнении.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВД	—	вентильный электродвигатель;								
ПВДМ	_	пазовый вентильный электродвигатель с постоянными магнитами								
		на роторе;								
БВДМ	-	беспазовый вентильный электродвигатель с постоянными								
		магнитами на роторе;								
ПМ	_	постоянные магниты;								
МДС	_	магнитодвижущая сила;								
ЭДС	_	электродвижущая сила;								
ΜΠΤ	_	машина постоянного тока;								
БМПТ	_	беспазовая машина постоянного тока;								
МΠ	_	магнитное поле;								
n	—	скорость вращения ротора;								
n_{max}	_	Максимальная скорость вращения ротора;								
т	—	число фаз;								
B_r	—	остаточная индукция постоянных магнитов;								
H_{CB}	_	коэрцитивная сила;								
l_{δ}	_	расчетная длина статора;								
D_i	—	диаметр расточки статора;								
z	_	число виртуальных пазов;								
f	_	частота тока;								
δ	_	размер немагнитного зазора;								
$\delta_{_B}$	_	размер воздушного зазора;								
$\delta_{_{K\Pi}}$	—	размер комбинированной обмотки;								
Y	_	шаг обмотки;								
$I_{\scriptscriptstyle H}$	—	номинальный ток;								
М	—	электромагнитный момент;								
τ	_	полюсное деление;								
I_{M}	_	встречный ток постоянных магнитов;								
-------------------------------------	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<i>b</i> м	_	ширина постоянных магнитов;								
$h_{\scriptscriptstyle \mathrm{M}}$	_	высота постоянных магнитов;								
μ_0	_	магнитная проницаемость вакуума;								
μ	_	относительная проницаемость;								
j	_	мнимая единица;								
β	_	угловой промежуток между краями соседних магнитов разной								
		полярности;								
С	_	некоторая константа, связанная с фиксацией фазы бегущей волны;								
t	_	время;								
δ_1	_	ширина спинки статора;								
δ_2	_	ширина спинки ротора;								
<i>Y</i> _k	—	шаг катушек обмотки статора;								
t_k	_	зубцовый шаг;								
δ_{ob}	_	высота обмотки статора;								
P_C	_	магнитные потери в ярме статора;								
m_C	_	масса стали ярма статора;								
B_{C}	_	средняя индукция в спинке статора;								
k_C	_	коэффициент заполнения сердечника сталью;								
γ_C	_	удельная масса стали;								
P_3	_	магнитные потери в спинке ротора;								
$P_{\mathfrak{B}}$	_	электрические потери в обмотке статора;								
R	_	измеренное сопротивление статорной обмотки;								
R_x	_	сопротивление обмотки статора в холодном состоянии при								
		температуре окружающей среды;								
t_o	_	температура окружающей среды;								

M_{max} – кратковременный (длительностью действия не более 1 с) перегрузочный момент;

- I_{do} длительно допустимый ток двигателя при моменте нагрузки на валу M_{do} (значение тока I_{do} справочное);
- *M_{do}* длительно допустимый момент нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Афанасьев, А. А. Метод сопряжения конформных отображений в задачах электромеханики / А. А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. унта, 2011. – 390 с.

 Афанасьев, А. А. Аналитические и численные методы решения задач электромеханики на основе комплексного магнитного потенциала / А. А. Афанасьев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – 430 с.

 Афанасьев, А. А. К расчету плоскопараллельных магнитных полей в нелинейных средах / А. А. Афанасьев, А. Н. Воробьев // Известия РАН. Энергетика и транспорт. – 1992. – № 2. – С. 77-91.

4. Афанасьев, А. А. Расчет магнитного поля синхронной явнополюсной машины / А. А. Афанасьев, В. М. Пупин // Изв. АН СССР.
Энергетика и транспорт. – 1983. – № 2. – С. 79-86.

Афанасьев, А. А. Линейные преобразования переменных в теории вентильно-индукторного двигателя / А. А. Афанасьев // Электричество. – 2004. – № 4. – С. 24-34.

6. Афанасьев, А. А. Малоинерционный высокоскоростной магнитоэлектрический беспазовый вентильный двигатель / А. А. Афанасьев [и другие] // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 28-35.

7. Афанасьев, А. А. Математическая модель постоянного магнита в воздушном зазоре электрической машины / А. А. Афанасьев // Электричество. – 2013. – № 10. – С. 42-47.

Афанасьев, А. А. Однофазные вентильные электродвигатели для системы охлаждения автомобильного мотора / А. А. Афанасьев [и другие] // Электричество. – 2010. – № 6. – С. 35-38.

9. Афанасьев, А. А. Расчёт магнитного поля магнитоэлектрических машин на основе комплексной потенциальной функции / А. А. Афанасьев // Электричество. – 2014. – № 1. – С. 10-47.

10. Алексеев, А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи / А. Е. Алексеев. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

 Бачаров, В. И. Беспазовые тяговые электродвигатели постоянного тока / В. И. Бочаров. – М.: Энергия, 1976. – 192 с.

Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков,
 Г. М. Кобельков. – М.: Наука, 1987. – 600 с.

13. Бербиренков, И. А. Обеспечение устойчивой работы тяговых вентильных электроприводов на низких частотах вращения: дис. ... кан-та тех. наук: 05.09.03 / И. А. Бербиренков ; науч. консультант В. В. Лохнин ; Московский Государственный технический универсистет «МАМИ». – Москва, 2011. – 122 с.

14. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования
/ В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 768 с.

15. Бинс К. Анализ и расчёт электрических и магнитных полей: Пер. с англ. / К. Бинс, П. Лауренсон. – М.: Энергия, 1970. - 376 с.

16. Благодатских, В. И. Введение в оптимальное управление / В. И. Благодатских. – М.: Высш. шк., 2001. – 239 с.

17. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн,К. А. Семендяев. – М.: Гос. изд.-во техн.- теор. литер., 1957. – 608 с.

18. Бодякшин, А. И. Метод расчета магнитных полей / А. И. Бодякшин. – М.: Наука, 1968. – 56 с.

Буль, Б. К. Основы теории электрических аппаратов / Б. К. Буль,
 Г. В. Буткевич, А. Г. Годжелло и др. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.

20. Бут, Д. А. Бесконтактные электрические машины / Д. А. Бут. – М.: Высш. школа, 1985. 255 с.

21. Ваганов, М. А. Магнитная индукция в воздушном зазоре вентильного двигателя / М. А. Ваганов, А. А. Гачук // Известия СПБГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – № 8. – С. 66-72.

 Вегнер, О. Г. Теория и практика коммутации машин постоянного тока / О. Г. Вегнер – М.; – Л.: Госэнерноиздат, 1961. – 272 с. 23. Вентильный двигатель: пат. 2454776 Рос. Федерация: МПК Н02К 29/06 / В. М. Мартемьянов, А. Г. Долгих; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2011100190/07; заявл. 11.01.2011; опубл. 27.06.2012. Бюл. – № 18. – 12 с.

24. Волокитина, Е. В. Новые моментные вентильные электродвигатели для прецизионных электроприводов технологических роботов и металлообрабатывающего оборудования / Е. В. Волокитина, А. И. Власов, Ю. Г. Опалев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 4. – С. 32-35.

25. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов / А. И. Вольдек. – СПБ.: Питер, 2008. – 320 с.: ил.

26. Гольдерг, О. Д. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Высш. шк., 1984. – 431 с. ил.

27. Демнрчян, К. С. моделирование магнитных полей / К. С. Демнрчян. – Л.: Энергия, 1974. – 288 с.

28. Ефимов, А. А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / А. А. Ефимов. – Новоуральск: НГТУ, 2001. – 250 с.

29. Иванов-Смоленский, А. В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1969. – 304 с.

30. Изотов, В. А. Беспазовые машины постоянного тока: состояние и перспективы развития / В. А. Изотов, В. В. Фетисов // Электромеханика. – 1997. – № 6. – С. 1-5.

31. Ильинский, Н. Ф. Перспективы развития регулируемого электропривода / Н. Ф. Ильинский // Электричество. – 2003. – № 2. – С. 3-7.

32. Казаков, Ю. Б. Конечно-элементное моделирование физических полей в электрических машинах / Ю. Б. Казаков, Ю. Я. Щелыкалов. – Иваново.: Иван. гос. энерг. ун-т, 2001. – 100 с.

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

34. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: учебик для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.: ил.

35. Коген-Далин, В. В. Расчет и испытание систем с постоянными магнитами / В.В. Коген-Далин, Е. В. Комаров. – М.: Энергия, 1977. – 248 с.

36. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1982.
 – 520 с.

37. Крутько, П. Д. Управление исполнительными системами роботов
 / П. Д. Крутько. – М.: Наука, 1991. – 334 с.

38. Крывой, В. Н. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока
/ В. Н. Крывой [и другие] // Информэлектро. – М., 1970. – С. 5-8.

Ледовский, А. Н. Электрические машины с
 высококоэрцитивными магнитами / А. Н. Ледовский. – М.: Энергоатомиздат,
 1985. – 169 с.

40. Макаров, Е. Инженерные расчеты в Mathcad 15: Учебный курс. – СПБ.: Питер, 2011. – 400 с.: ил.

41. Милош Штафль. Электродинамические задачи в электрических машинах и трансформаторах. Пер. с чешского / Милош Штафль. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 200 с.

42. Нгуен, К. Т. Беспазовый магнитоэлектрический вентильный двигатель с комбинированным проводом / К. Т. Нгуен, А. А. Афанасьев // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 5-12.

43. Нгуен, К. Т. Полевая аналитическая модель беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя / К. Т. Нгуен, А. А. Афанасьев, Д. А. Токмаков // Электричество. – 2018. - № 1. – С. 48-56.

44. Нгуен, К. Т. ЭДС обмотки статора и момент магнитоэлектрического беспазового вентильного двигателя / К. Т. Нгуен // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 3. – С. 109-114.

45. Нгуен, К. Т. Влияние высоты магнитов на рабочие свойства магнитоэлектрического беспазового вентильного двигателя / К. Т. Нгуен // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 44-51.

46. Нгуен, К. Т. Анализ комбинированного провода для беспазовых магнитоэлектрических вентильных двигателей / К. Т. Нгуен // Электрооборудование: Эксплуатация и ремонт. – 2017. – № 12. – С. 42-45.

Нгуен, К. Т. Сравнительный анализ КПД и электромагнитных 47. беспазового И магнитоэлектрических вентильных потерь пазового двигателей / К. Т. Нгуен, Е. А. Терентьев, Д. А. Токмаков // Повышение энергоэффективности электротехнических надежности И систем И комплексов: межвузовский сборник научных трудов – Уфа: Изд-во Энергодиагностика. – 2018. – С. 22-25.

48. Нгуен, К. Т. Вентильный электродвигатель / К. Т. Нгуен, К. В. Динь, Т. Б. Ле // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2015. – № 4. – С. 142-144.

49. Нейман, Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Л. Р. Нейман. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 190 с.

50. Николаев, А. В. Разработка и исследование беспазовых электромеханических компонентов ветроэнергетических вентильномашинных систем: дис. ... кан-та техн. наук: 05.09.01 / А. В. Николаев; научный руководитель А. А. Афанасьев; Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова. – Чебоксары, 2006. – 241 с.

51. Овчинников, И. Е. Теория вентильных электрических двигателей/ И. Е. Овчиников. – Л.: Наука, 1985. – 164 с.

52. Пахомин, С. А. Влияние геометрии зубцового слоя и параметров питания на показатели вентильного реактивного индукторного двигателя /
 С. А. Пхомин // Электромеханика. – 2000. – № 1. – С. 30-36.

53. Петров, Г. Н. Электрические машины. Часть 2 / Г. Н. Петров.
– М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.

54. Привезенцев, В. А. Обмоточные и монтажные провода / В. А. Привезенцев, И. Б. Пешков. – М.: Энергия, 1971. – 522 с.

55. Поливанов, К. М. Теоретические основы электротехники. Часть 3/ К. М. Поливанов. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.

56. Постоянные магниты: справочник / под ред. Ю. М. Пятина. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

57. Сергеев, П. С. Электрические машины / П. С. Сергеев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 280 с.

58. Ровенского, Б. А. Статические преобразователи частоты в электроприводах переменного тока / П. А. Ровенского, Б. А. Тикана. – Л.: Наука, 1968. – 230 с.

59. Сейдж, Э. П. Оптимальное управление системами / Э. П. Сейдж,
Ч. С. Уайт. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.

60. Сипайлов, Г. А. Математическое моделирование электрических машин / Г. А. Сипайлов, А. В. Лосс. – М.: Высш. шк., 1980. – 176 с.

61. Тамм, И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – М.: Наука. Гл. ред. физ. Мат. лит., 1989. – 504 с.

62. Фалеев, М. В. Моментный электропривод систем наведения мобильных робототехнических комплексов / М. В. Фалеев, [и другие] // Вестник ИГЭУ. Сер. Электромеханика. – Иваново, 2008. – № 3. – С. 17-19.

63. Чураков, Е. П. Оптимальные и адаптивные системы / Е. П.
Чураков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

64. Шуйский, В. П. Расчёт электрических машин: пер. с немецкого / В. П. Шуйский. – М.: Энергия, 1968. – 732 с.

65. Юферов, Ф. М. Электрические машины автоматических устройств
/ Ф. М. Юферов. – М.: Высш. шк., 1976. – 416 с.

66. Florence Meier. Permanent-magnet synchronous machines with nonoverlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications: Thesis ... doctor of technical sciences / Florence Meier; supervisor Ass. Prof. Juliete Soulard; Roayal institute of technology. Stockholm, 2008. – 165 P. 67. M. Sanada. Efficiency Improvement in High Speed Operation using Slot-less Configuration for Permanent Magnet Synchronous Motor / M. Sanada,
S. Morimoto // IEEE PES 2007 General meeting 24-28 June. – Tampa FL USA, 2007. – P. 3-27.

68. M. Sanada. Thrust improvement of linear electromagnetic actuator using compound wire with copper and iron / M. Sanada, T. Ogawa, S. Morimoto, and Y. Takeda // Proc. of 2005 international power electronics conference Niigata. – Niigata, 2005. – P. 431-433.



ПРИЛОЖЕНИЕ А. Сборочный чертёж БВДМ.



ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Габаритный чертёж БВДМ.



ПРИЛОЖЕНИЕ В. Сборочный чертёж статора БВДМ



ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Сборочный чертёж ротора БВДМ.



ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Лист ротора БВДМ.

Наименование средства измерения	Класс точности или погреш- ность	Предел измерения	Заводской (инвентарный) номер	Сведения о поверке
Клещи токовые АТК-2200	1,5 %	0,1 – 2000 A	13310666	19.08.2016
Набор термопар ТМК медь-константан	0,1	-40 – 135°C	3	08.2016
Источник питания Б5-47	0,5	0 – 30 B 0 –5 A	10572	13.06.2016
Фототахометр АТТ-6000	0,05 %	10 – 99999 Об/мин	A.C.35713	15.07.2016
Мультиметр АМ- 1006	1 %	100 мкВ - 600 В	E69708	30.10.2016
Нагрузочный стенд	1,0	10-300 Н·м	011	04.2017

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Приборы и оборудование

		<i>М_{do},</i> Н·м	n,	Обмоточные данные на 300 в				
				Число	Число	Диаметр	Macca	
	<i>L</i> , мм			элемен	витков	обмоточ	одной	
обозначение			об/мин	тарных	в ка-	ного	катушки	
				провод	тушке,	провода		
				ников,				
				ШТ	ШТ	ММ	Г	
БКЖИ.6854.003			2000	2	36		30	
- 01		2,3		_		0,50	60	
- 02			3000	2	24		30	
- 03	85		3000				60	
- 04	85-0,30		4000	5			31	
- 05						0,63	62	
- 06			6000	5	12		26	
- 07			0000	5	12		52	
- 08			2000	3	23	0,56	34	
- 09							68	
- 10			3000	4	15		31	
- 11	105 0.25	35					62	
- 12	105-0,35	5,5	4000	5	11		40	
- 13			4000				80	
- 14			6000	7	7	0,63	36	
- 15							72	
- 16	125-0,40	4,7	2000	3	18		46	
- 17							92	
- 18			3000	5	12	0,56	34	

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Группа катушечная обмотки статора БВДМ

- 19							68
- 20			4000	6	9	0,63 0,56 0,63	46
- 21							92
- 22			6000	9	6		46
- 23							92
- 24	165-0,40	7,0	2000	4 7 9	13 8 6		55
- 25							110
- 26			3000				39
- 27							78
- 28			4000				57
- 29			1000				114
- 30			6000	10	4		42
- 31			0000	10	•		84

		<i>М_{do},</i> Н · м	<i>п,</i> об/мин	Обмоточные данные на 500 в				
				Число	Число	Диаметр	Macca	
				элемен	витков	обмоточ	одной	
обозначение	<i>L</i> , мм			тарных	в ка-	ного	катушки	
				провод	тушке,	провода		
				ников,				
				ШТ	ШТ	ММ	Г	
БКЖИ.6854.003.32	85-0,30	2,3	2000	1	56	0,63	35	
- 33				1	50		70	
- 34			3000	2	37	0,50	30	
- 35					51		60	
- 36			4000		28	0.63	35	
- 37						0,00	70	

- 38			6000	3	18		35
- 39			0000	5	10		70
- 40			2000		42	0.45	34
- 41	105-0,35	3,5	2000	. 2	42	0,45	68
- 42			3000		28	0,63	41
- 43							82
- 44				3	21	0,56	34
- 45			4000				68
- 46			6000	4	14	0,63	41
- 47	4		0000				82
- 48	125-0,40	4,7	2000	2	33	0,50	41
- 49							82
- 50			3000	3	22		46
- 51							92
- 52			4000	3	16 17	0,63	46
- 53							92
- 54			6000	5			46
- 55							92
- 56			2000	3	24	0.50	59
- 57			2000	5	27	0,50	112
- 58			3000	3	16	0,63	49
- 59							98
- 60			4000	5	12	0,56	45
- 61							90
- 62			6000	7	8	0,63	58
- 63							116

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Материал об использовании и практической полезности

результатов диссертационного исследования

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»)

> Московский пр., 15, г. Чебоксары, 428015 Тел.: (8352) 583-036; факс: (8352) 450-279 E-mail: oper@chuvsu.ru; office@chuvsu.ru ОРГН 1022101274315 ИНН 2129009412



об использовании результатов диссертационного исследования Нгуена Конга Тама на тему «Разработка и исследование беспазового вентильного двигателя с постоянными магнитами»

Мы. ниже подписавшиеся, заведующий кафедрой электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, кандидат технических наук, доцент Калинин Алексей Германович, Владимиров Эдуард Васильевич, Галина Алексеевна Кравченко, настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Нгуена Конга Тама на тему «Разработка и исследование беспазового вентильного двигателя с постоянными магнитами», представляемой на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 - «Электромеханика и электрические аппараты». используются в учебном процессе на кафедре электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, в частности, учтены в рабочих программах и фонде оценочных средств дисциплины «Электрические машины» рабочих учебных планов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилям:

- Электрические и электронные аппараты;
- Электропривод и автоматика;
- Электротехнологические установки и процессы, установки и приборы электронагрева;
- Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника;
- Электроснабжение;
- Электрическое хозяйство и сети предприятий, организаций и учреждений, электрооборудование низкого и высокого напряжения.

Использование результатов позволило расширить компетенции выпускников и повысить качество образовательного процесса.

А.Г. Калинин Э.В. Владимиров Г.А. Кравченко