

На правах рукописи

НГУЕН КОНГ ТАМ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСПАЗОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары – 2018

Работа выполнена на кафедре электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Афанасьев Александр Александрович

Официальные оппоненты: **Копылов Сергей Игоревич**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединённый институт высоких температур Российской академии наук, лаборатория сверхпроводниковых устройств и преобразовательной техники, заведующий лабораторией;

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

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится «14» декабря 2018 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д 38 (учебный корпус № 3), зал заседаний Ученого совета, к.301.

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

Автореферат разослан « 15 » октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Однако такое расположение проводников обмотки статора приводит и к отрицательным последствиям:

- повышенным магнитным потерям в стали зубцов статора;
- образованию реактивного момента (момента «залипания»), обусловленного неравномерностью воздушного зазора;
- появлению вихревых токов в массиве магнитов.

Первый фактор вызывая нагрев статорного сердечника, снижает допустимый уровень тока статора по условиям нагревостойкости изоляции проводников обмотки.

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

Третий фактор, связанный с нагревом магнитов, приводит к их размагничиванию и, следовательно, уменьшению перегрузочной способности двигателя.

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, В.А. Нестерин, И.А. Вевюрко, В.А. Балагуров, А.А. 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 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 задач применились теоретические исследования 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 на Чебоксарском 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».

Личный вклад автора. Выполнение всех представленных в работе расчётов, составление аналитических моделей и разработка методики проектирования, а также непосредственное участие в проведении экспериментальных исследований, разработке конструкции экспериментального образца беспазового 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены объект исследования, цели, задачи и новые научные результаты диссертационной работы, представлены положения, выносимые на защиту, а также структура работы.

Во первой главе выполнен обзор работ по беспазовым машинам постоянного тока и известных конструкций беспазового вентильного двигателя с высококоэрцитивными постоянными магнитами на роторе. Определены основные проблемы и задачи, решение которых является необходимым условием для разработки современных беспазовых магнитоэлектрических вентильных двигателей (БВДМ). Показано что постоянные магниты и трехфазные двухслойные обмотки находят широкое применение в беспазовых магнитоэлектрических машинах.

Проведен обзор используемых за рубежом комбинированных обмоточных проводов из меди и железа для обмотки статора БВДМ. При применении в БВДМ медно-железного провода с медной основной и железной оболочкой его электромагнитный момент может увеличить более чем в 2 раза по сравнению момента того же двигателя с обычным проводом. При высоких скоростях вращения комбинированный провод с железной основной и медной оболочкой с точки зрения потерь будет лучшим вариантом для использования в БВДМ.

Беспазовый магнитоэлектрический вентильный двигатель с комбинированной обмоткой имеет электромагнитный момент, не уступающий моменту пазового вентильного двигателя с обычной обмоткой.

Во второй главе рассмотрена полевая аналитическая модель для активной зоны и ярмовых участков БВДМ, приведены формулы, графические зависимости, иллюстрирующие взаимосвязь между основными параметрами. В основе модели лежит аналитическое решение граничной задачи Дирихле для бесконечной полосы методом разделения переменных. С помощью модели анализируется распределение электромагнитного поля в поперечном сечении двигателя.

Общее решение граничной задачи Дирихле в двумерной бесконечной полосе задействовано при периодическом изменении магнитного потенциала

$u(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\alpha x$ на нижней границе полосы (где $y = 0$)

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

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

Если считать зависимость (1) (после умножения её на мнимую единицу j) скалярным магнитным потенциалом и вычислить сопряженную ей гармоническую функцию магнитного потока $v(x, y)$, то для комплексного скалярного магнитного потенциала бесконечной полосы в плоскости z будет справедливо

$$w(z) = v(x, y) + ju(x, y) \quad (2)$$

Источником плоскопараллельного магнитного поля призматического магнита с прямоугольным поперечным сечением являются встречные токи $I_M = 2H_{CB} h_M$ двух параллельных шин, имеющих высоту $2b = h_M$ (h_M – высота магнита в направлении его намагниченности), толщину a и находящиеся на расстоянии ширины магнита b_M .

В общем случае распределение магнитного потенциала на нижней стороне полосы можно описать (с учетом характера расположения постоянных магнитов на ярме ротора) тригонометрическим рядом с наличием синусных и косинусных слагаемых

$$u(x) = \frac{I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\alpha x + b_n \sin n\alpha x). \quad (3)$$

В бесконечной горизонтальной полосе плоскости $z = x + jy$ ток I_M магнитных шин ротора вызовет комплексный скалярный магнитный потенциал, который после его представления косинусной основной гармоникой в выражения (3), получит вид

$$w_{cos}(z) = v(x, y) + ju(x, y) = \frac{-I_M a_1}{2sh\alpha\delta} \left\{ \begin{array}{l} \sin\alpha x \operatorname{ch}[\alpha(y-\delta)] + \\ + j \cos\alpha x \operatorname{sh}[\alpha(y-\delta)] \end{array} \right\} = -\frac{I_M a_1}{2sh\alpha\delta} \sin[\alpha(z - j\delta)] \quad (4)$$

Тогда для комплексного скалярного магнитного потенциала, учитывающего весь спектр косинусных гармоник, будем иметь

$$w_{cos}(z) = -\frac{I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n \left[\begin{array}{l} \sin n\alpha x \operatorname{ch} n\alpha(y-\delta) + \\ + j \cos n\alpha x \operatorname{sh} n\alpha(y-\delta) \end{array} \right]}{sh n\alpha\delta} = -\frac{I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n \sin[\alpha(z - j\delta)n]}{sh n\alpha\delta}. \quad (5)$$

Так же может быть получен комплексный скалярный магнитный потенциал, учитывающий весь спектр синусных гармоник выражения (3)

$$w_{sin}(z) = -\frac{I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n \left\{ \begin{array}{l} \cos n\alpha x \operatorname{ch}[n\alpha(\delta - y)] - \\ - j \sin n\alpha x \operatorname{sh}[n\alpha(\delta - y)] \end{array} \right\}}{sh n\alpha\delta} = -\frac{I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n \cos n\alpha(z^* + j\delta)}{sh n\alpha\delta}. \quad (6)$$

где $z^* = x - jy$ – комплексно – сопряжённый вектор.

Можно записать выражение (6) в комплексно - сопряжённой форме для вектора $w^*_{sin}(z)$

$$w^*_{sin}(z) = -\frac{I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n \left\{ \begin{array}{l} \cos n\alpha x \operatorname{ch}[n\alpha(\delta - y)] + \\ + j \sin n\alpha x \operatorname{sh}[n\alpha(\delta - y)] \end{array} \right\}}{sh n\alpha\delta} = -\frac{I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n \cos n\alpha(z - j\delta)}{sh n\alpha\delta}. \quad (7)$$

Для комплексно – сопряжённого вектора магнитной индукции справедливо выражение

$$B^*(z) = j\mu_0 \frac{dw(z)}{dz}. \quad (8)$$

Магнитная индукция, которую создают косинусные гармоники скалярного магнитного потенциала магнитов ротора из формулы (5), при использовании выражения (8) получит вид

$$B_{\cos}^*(z) = -\frac{\mu_0 \alpha I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n a_n \left\{ \begin{array}{l} \sin n \alpha x \operatorname{sh} n \alpha (y - \delta) + \\ + j \cos n \alpha x \operatorname{ch} n \alpha (y - \delta) \end{array} \right\}}{\operatorname{sh} n \alpha \delta} = -\frac{j \mu_0 \alpha I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n a_n \cos [n \alpha (z - j \delta)]}{\operatorname{sh} n \alpha \delta}. \quad (9)$$

Поскольку

$$B(z) = -j \mu_0 \frac{d w^*(z)}{dz}. \quad (10)$$

то магнитная индукция, которую вызывают синусные гармоники скалярного магнитного потенциала магнитов ротора, с учётом формул (7), (10) будет представлена формулой

$$B_{\sin}(z) = -\frac{\mu_0 \alpha I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n b_n \left\{ \begin{array}{l} -\cos n \alpha x \operatorname{sh} n \alpha (y - \delta) + \\ + j \sin n \alpha x \operatorname{ch} n \alpha (y - \delta) \end{array} \right\}}{\operatorname{sh} n \alpha \delta} = -\frac{j \mu_0 \alpha I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n b_n \sin [n \alpha (z - j \delta)]}{\operatorname{sh} n \alpha \delta}. \quad (11)$$

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

$$u(x, \vartheta) = \frac{I_M}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n \alpha x = \frac{4 I_M}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta (2n-1)}{2n-1} \sin [\alpha (2n-1)(x - \vartheta)] \quad (12)$$

Составляющие магнитной индукции по осям x и y , вызванной постоянными магнитами ротора в соответствии с формулой (11), будут иметь вид

$$B_{px}(x, y, \vartheta) = \frac{2 \mu_0 \alpha I_M}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta (2n-1)}{\operatorname{sh} \alpha (2n-1) \delta} \operatorname{sh} [\alpha (2n-1)(y - \delta)] \cos [\alpha (2n-1)(x - \vartheta)] \quad (13)$$

$$B_{py}(x, y, \vartheta) = -\frac{2 \mu_0 \alpha I_M}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta (2n-1)}{\operatorname{sh} \alpha (2n-1) \delta} \operatorname{ch} [\alpha (2n-1)(y - \delta)] \sin [\alpha (2n-1)(x - \vartheta)] \quad (14)$$

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

На рисунке 1 показаны составляющие индукции магнитного поля рассматриваемого БВДМ, вызванные неодим-железо-боровыми магнитами высотой 7,3 мм.

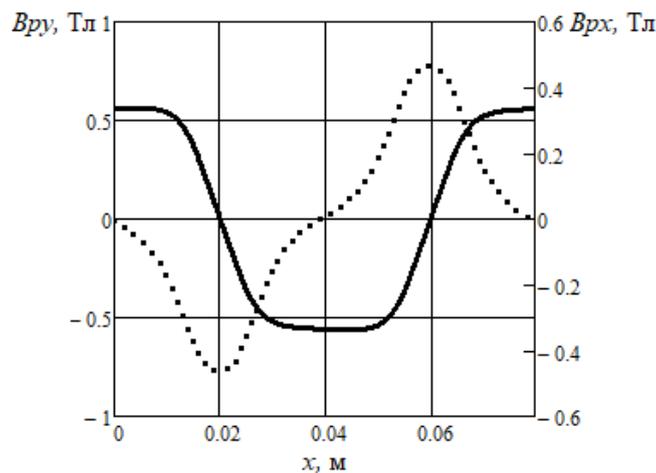


Рисунок 1 – Составляющие индукции магнитного поля по осям y (сплошная линия) и x (пунктирная линия) на поверхности магнитов ($y = h_M$), вызванные МДС магнитов

Магнитодвижущая сила (МДС) \tilde{m} фазной обмотки статора представлена формулой

$$\begin{aligned}
 F_{\text{тв}} = & \frac{\tilde{m}}{2} F_{m1} \left(\sin \omega t \cos \frac{x\pi}{\tau} - \cos \omega t \sin \frac{x\pi}{\tau} \right) + \\
 & + \frac{\tilde{m}}{2} \sum_{k=1}^{\infty} F_{m(2\tilde{m}k+1)} \left[\sin \omega t \cos \frac{(2\tilde{m}k+1)x\pi}{\tau} - \cos \omega t \sin \frac{(2\tilde{m}k+1)x\pi}{\tau} \right] + \\
 & + \frac{\tilde{m}}{2} \sum_{k=1}^{\infty} F_{m(2\tilde{m}k-1)} \left[\sin \omega t \cos \frac{(2\tilde{m}k-1)x\pi}{\tau} + \cos \omega t \sin \frac{(2\tilde{m}k-1)x\pi}{\tau} \right].
 \end{aligned} \quad (15)$$

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 и основной гармоник одной фазы обмотки статора; $k = 1, 2, 3, \dots$

Для основной бегущей волны координаты x и t связаны между собой равенством, вытекающим из формулы (15)

$$x(t) = \frac{\omega\tau}{\pi} t + C = \frac{\omega}{\alpha} t + C. \quad (16)$$

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

Для комплексного скалярного магнитного потенциала в немагнитном зазоре, вызванного МДС обмотки статора будем иметь в соответствии с формулой (15)

$$\begin{aligned}
 w_{\text{статор}}(z) = & [w_{\cos}(z) + w_{\sin}(z)] = \\
 & \left\{ \begin{aligned} & \sin(\omega t) \frac{k_{w1} [\sin \alpha z]}{sh(\alpha \delta)} - \cos(\omega t) \frac{k_{w1} [\cos \alpha z]}{sh(\alpha \delta)} + \\ & + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k+1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta} - \\ & - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k+1)sh(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta} + \\ & + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta} + \\ & + \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{(2\tilde{m}k-1)sh(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta} \end{aligned} \right\} \\
 = & -\frac{\sqrt{2}\tilde{m}}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ \dots \right\}.
 \end{aligned} \quad (17)$$

На рисунке 2 показаны составляющие скалярного потенциала магнитного поля обмотки статора на поверхности магнитов ($y = h_m$) – кривые 1 и 3, на внутренней поверхности статора ($y = \delta$) – кривые 2 и 4 рассматриваемого макета БВДМ, рассчитанные по выражению (17) для момента времени $t = 0$.

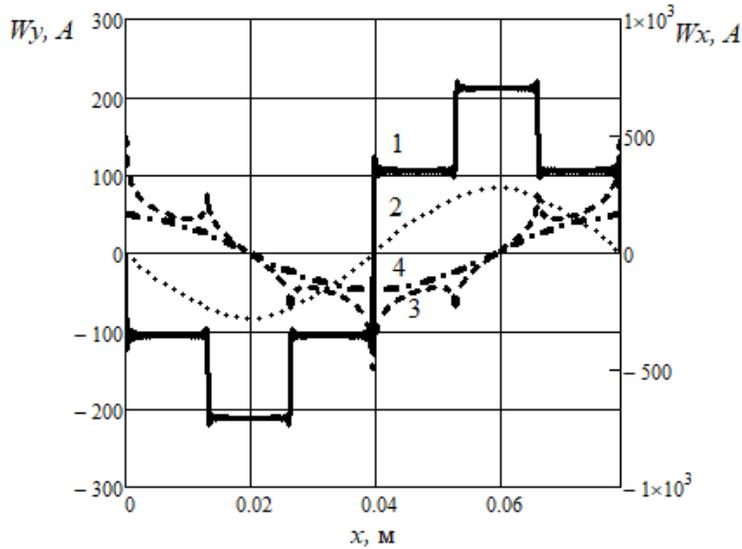


Рисунок 2 – Составляющие скалярного потенциала магнитного поля по осям y (кривые 1 и 2) и x (кривые 3 и 4), вызванные магнитодвижущей силой обмотки статора

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

В соответствии с формулой (17) комплексно-сопряжённый вектор магнитной индукции, вызванной током обмотки статора, представлен формулой

$$\begin{aligned}
 B^*(z) &= j\mu_0 \frac{d w_{\text{статор}}(z)}{dz} = \\
 &= -j \frac{\sqrt{2\tilde{m}}\mu_0\alpha}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ \begin{aligned}
 & \sin(\omega t) \frac{k_{w1}[\cos \alpha z]}{\text{sh}(\alpha\delta)} + \cos(\omega t) \frac{k_{w1}[\sin \alpha z]}{\text{sh}(\alpha\delta)} + \\
 & + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha z]}{\text{sh}(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta} + \\
 & + \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)}[\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha z]}{\text{sh}(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta} + \\
 & + \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{\text{sh}(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta} - \\
 & - \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)}[\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha z]}{\text{sh}(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta}.
 \end{aligned} \right. \quad (18)
 \end{aligned}$$

После разделения выражения (18) на мнимую и вещественную части, получим, составляющие индукции магнитного поля на поверхности постоянных магнитов для момента времени $t = 0$ рассматриваемого макетного образца БВДМ

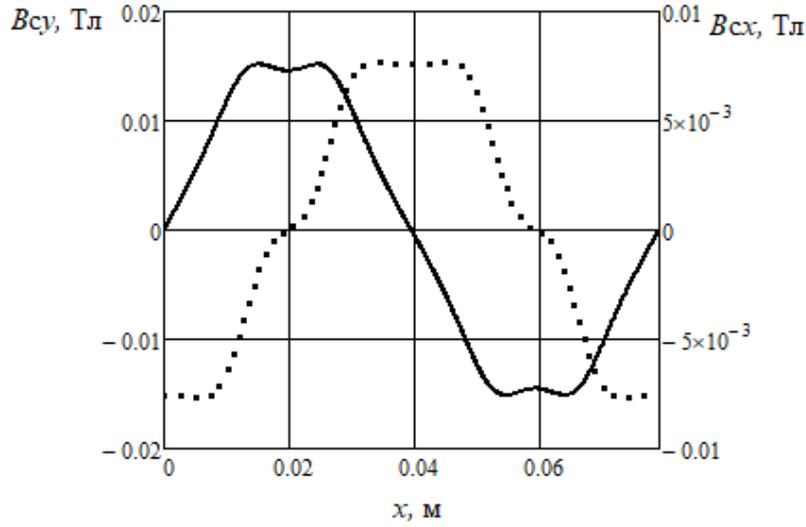


Рисунок 3 – Составляющие индукции магнитного поля по осям y (сплошная линия) и x (пунктирная линия) на поверхности магнитов ($y = h_m$), вызванные током обмотки статора

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

$$B_{cx}(x, \delta) = {}^c B_{cx}(x, 0) / \mu_{r1}, \quad B_{cy}(x, \delta) = {}^c B_{cy}(x, 0) \quad (19)$$

следует преобразовать формулу (18) для ярмовой полосы статора путем введения в неё соответствующих граничных коэффициентов. После этой процедуры приведения формул к условиям сопряжения магнитных полей выражения для приведенных магнитных индукций ярма статора будут иметь вид (после разделения на мнимой и вещественной части)

$${}^c B_{cx}(x, y) = -\frac{\sqrt{2}\tilde{m}\mu_0\mu_{r1}\alpha w}{\pi p} I \times \left\{ \begin{aligned} & k_{cx} \sin(\omega t) \frac{k_{w1} [\sin \alpha x \operatorname{ch} \alpha (y - \delta_1)]}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_1)} - k_{cx} \cos(\omega t) \frac{k_{w1} [\cos \alpha x \operatorname{ch} \alpha (y - \delta_1)]}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_1)} + \\ & + k_{cx2}(k) \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x \operatorname{ch}(2\tilde{m}k+1)\alpha (y - \delta_1)]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_1} - \\ & - k_{cx2}(k) \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x \operatorname{ch}(2\tilde{m}k+1)\alpha (y - \delta_1)]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_1} + \\ & + k_{cx1}(k) \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x \operatorname{ch}(2\tilde{m}k-1)\alpha (y - \delta_1)]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_1} + \\ & + k_{cx1}(k) \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x \operatorname{ch}(2\tilde{m}k-1)\alpha (y - \delta_1)]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_1} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

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

$${}^c B_{cy}^*(x, y) = \frac{\sqrt{2\tilde{m}\mu_0\alpha}}{\pi} \frac{w}{p} I \times \left\{ \begin{aligned} & k_{cy} \sin(\omega t) \frac{k_{w1} [\cos \alpha x sh \alpha (y - \delta_1)]}{sh(\alpha \delta_1)} + k_{cy} \cos(\omega t) \frac{k_{w1} [\sin \alpha x sh \alpha (y - \delta_1)]}{sh(\alpha \delta_1)} + \\ & + k_{cy2}(k) \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x sh(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_1)]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_1} + \\ & + k_{cy2}(k) \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x sh(2\tilde{m}k+1)\alpha(y-\delta_1)]}{sh(2\tilde{m}k+1)\alpha\delta_1} \\ & + k_{cy1}(k) \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_1)]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_1} - \\ & - k_{cy1}(k) \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x sh(2\tilde{m}k-1)\alpha(y-\delta_1)]}{sh(2\tilde{m}k-1)\alpha\delta_1}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где $k_{cy} = -\frac{ch\alpha\delta}{sh\alpha\delta}$; $k_{cy1}(k) = -\frac{ch(k-1)\alpha\delta}{sh(k-1)\alpha\delta}$; $k_{cy2}(k) = -\frac{ch(k+1)\alpha\delta}{sh(k+1)\alpha\delta}$ – коэффициенты приведения.

Представляя скалярный магнитный потенциал магнитов, расположенных в воздушной полосе на поверхности ярма ротора (на нижней границе бесконечной полосы воздушного зазора шириной δ), синусным рядом (12), получили тангенциальную составляющую магнитной индукции (13) 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

$${}^p B_{px}^*(x, y, \vartheta) = \frac{2\mu_0\alpha I_M}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta} \cos[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] ch[\alpha(2n-1)(y-\delta)] \quad (22)$$

В этом случае на границе с ярмом статора ($y=\delta$) рассматриваемая составляющая индукции в воздушном зазоре не будет равна нулю. Перенеся источник магнитного поля (12) на нижнюю границу полосы ярма статора шириной δ_1 , можем записать формулы для магнитной индукции в этой полосе с учётом граничных условий для двух рассматриваемых полос

$${}^p B_{cx}^*(x, y, \vartheta) = \frac{2\mu_0\mu_r\alpha I_M}{\pi} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta_1} k_{cx}(n) \cos[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] ch[\alpha(2n-1)(y-\delta_1)] \quad (23)$$

$${}^p B_{cy}^*(x, y, \vartheta) = -\frac{2\mu_0\alpha I_M}{\pi} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta(2n-1)}{sh\alpha(2n-1)\delta_1} k_{cy}(n) \sin[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] sh[\alpha(2n-1)(y-\delta_1)] \quad (24)$$

где $k_{cx}(n) = \frac{sh[(2n-1)\alpha\delta_1]}{sh[(2n-1)\alpha\delta]} \frac{1}{ch[(2n-1)\alpha(\delta-\delta_1)]}$ $k_{cy}(n) = \frac{sh[(2n-1)\alpha\delta_1]}{sh[(2n-1)\alpha\delta]} \frac{1}{sh[(2n-1)\alpha(\delta-\delta_1)]}$

– коэффициенты приведения.

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

$${}^c B_{px}^*(x, y) = -\frac{\sqrt{2\tilde{m}}\mu_0\mu_{r2}\alpha w}{\pi p} I \times \left\{ \begin{aligned} & k_{px} \sin(\omega t) \frac{k_{w1} [\sin \alpha x \operatorname{ch} \alpha (y - \delta_2)]}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_2)} - k_{px} \cos(\omega t) \frac{k_{w1} [\cos \alpha x \operatorname{ch} \alpha (y - \delta_2)]}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_2)} + \\ & + k_{px2}(k) \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x \operatorname{ch}(2\tilde{m}k+1)\alpha (y - \delta_2)]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_2} - \\ & - k_{px2}(k) \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x \operatorname{ch}(2\tilde{m}k+1)\alpha (y - \delta_2)]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_2} + \\ & + k_{px1}(k) \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x \operatorname{ch}(2\tilde{m}k-1)\alpha (y - \delta_2)]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_2} + \\ & + k_{px1}(k) \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x \operatorname{ch}(2\tilde{m}k-1)\alpha (y - \delta_2)]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_2} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где $k_{px} = \frac{\operatorname{sh}(\alpha \delta_2)}{\operatorname{sh}(\alpha \delta)}$; $k_{px1}(k) = \frac{\operatorname{sh}[\alpha \delta_2 (2\tilde{m}k-1)]}{\operatorname{sh}[\alpha \delta (2\tilde{m}k-1)]}$; $k_{px2}(k) = \frac{\operatorname{sh}[\alpha \delta_2 (2\tilde{m}k+1)]}{\operatorname{sh}[\alpha \delta (2\tilde{m}k+1)]}$ – коэффициенты приведения.

Для радиальной составляющей магнитной индукции в ярме ротора будем иметь

$${}^c B_{py}^*(x, y) = -\frac{\sqrt{2\tilde{m}}\mu_0\mu_{r2}\alpha w}{\pi p} I \times \left\{ \begin{aligned} & k_{py} \sin(\omega t) \frac{k_{w1} [\cos \alpha x \operatorname{sh} \alpha y]}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_2)} - k_{py} \cos(\omega t) \frac{k_{w1} [\sin \alpha x \operatorname{sh} \alpha y]}{\operatorname{sh}(\alpha \delta_2)} + \\ & + k_{py2}(k) \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\cos(2\tilde{m}k+1)\alpha x \operatorname{sh}(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_2} - \\ & - k_{py2}(k) \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k+1)} [\sin(2\tilde{m}k+1)\alpha x \operatorname{sh}(2\tilde{m}k+1)\alpha y]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k+1)\alpha \delta_2} + \\ & + k_{py1}(k) \sin(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\cos(2\tilde{m}k-1)\alpha x \operatorname{sh}(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_2} + \\ & + k_{py1}(k) \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k_{w(2\tilde{m}k-1)} [\sin(2\tilde{m}k-1)\alpha x \operatorname{sh}(2\tilde{m}k-1)\alpha y]}{\operatorname{sh}(2\tilde{m}k-1)\alpha \delta_2} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

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

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

$${}^p B_{px}^*(x, y, \vartheta) = \frac{2\mu_0\mu_{r2}\alpha I_M}{\pi} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{\operatorname{sh}\alpha(2n-1)\delta_1} k_{px}(n) \cos[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] \operatorname{ch}[\alpha(2n-1)y]. \quad (27)$$

$${}^p B_{py}^*(x, y, \vartheta) = -\frac{2\mu_0\alpha I_M}{\pi} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\beta(2n-1)}{\operatorname{sh}\alpha(2n-1)\delta_1} k_{py}(n) \sin[\alpha(2n-1)(x-\vartheta)] \operatorname{sh}[\alpha(2n-1)y]. \quad (28)$$

где $k_{px}(n) = -\frac{\operatorname{sh}[(2n-1)\alpha\delta_2]}{\operatorname{ch}[(2n-1)\alpha\delta_2]}$; $k_{py}(n) = \frac{\operatorname{ch}[(2n-1)\alpha\delta]}{\operatorname{sh}[(2n-1)\alpha\delta]}$ – коэффициенты приведения

Беспазовая обмотка, имея достаточно большую толщину, является значительной частью немагнитного зазора беспазового вентильного двигателя (БВД). Другими частями его являются высокоэнергетический магнит и воздушный зазор. Анализируем ЭДС обмотки и электромагнитный момент БВД для вариантов одно и двухмерного характера магнитного поля в зазоре.

Мгновенные значения ЭДС фазы обмотки статора и электромагнитного момента, наведенной результирующим потоком индукции магнитного поля в воздушном зазоре по оси y , с учётом выражения (16), представлены

$$e(t) = -\frac{d\Psi(t)}{dt} = -2plw_k \frac{d}{dt} \left\{ \begin{array}{l} \int_{x(t)}^{x(t)+y_k} B_y[x(t), h_m, \tau/2] dx + \\ \int_{x(t)+t_k}^{x(t)+y_k+t_k} B_y[x(t), h_m, \tau/2] dx \end{array} \right\} =$$

$$= -2plw_k \left\{ \int_{x(t)}^{x(t)+y_k} \frac{\partial B_y[x(t), h_m, \tau/2]}{\partial t} dx + \int_{x(t)+t_k}^{x(t)+y_k+t_k} \frac{\partial B_y[x(t), h_m, \tau/2]}{\partial t} dx \right\} - \quad (29)$$

$$- 2pw_k l \frac{\omega}{\alpha} \left\{ B_y[(x(t)+y_k), h_m, \tau/2] - B_y[x(t), h_m, \tau/2] + \right.$$

$$\left. + B_y[(x(t)+t_k), h_m, \tau/2] - B_y[(x(t)+y_k+t_k), h_m, \tau/2] \right\},$$

$$M(t) = \frac{1}{\Omega} \sum_{j=1}^{\tilde{m}} e \left[t - \frac{(j-1)T}{\tilde{m}} \right] i \left[t - \frac{(j-1)T}{\tilde{m}} \right], \quad (30)$$

Значения электродвижущей силы и электромагнитного момента рассматриваемого БВДМ для номинального тока $I = 5$ А, подсчитанные по формулам (29) и (30) для времени $t = 0$ в математической программе Mathcad 15, равны соответственно 58,3 В и 6,24 Н·м.

Рассмотрим влияние вариации магнитной индукции по высоте обмотки статора $\delta_{об}$. Для этого разбиваем обмотку статора на 10 слоёв и суммируем расчетные значения электромагнитного момента и ЭДС для указанных слоёв и сравниваем полученные результаты с предыдущими значениями. Суммарные значения электромагнитных моментов и ЭДС десяти слоев будут равны 6,18 Н·м, 58,05 В. Эти показатели, вычисленные ранее для одномерного характера магнитного поля в немагнитном зазоре, имели значения 6,24 Н·м, 58,3 В. Следовательно, 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.

Современные высококоэрцитивные постоянные магниты наиболее адаптированы для применения в беспазовых вентильных двигателях. В БВДМ при сохранении наружного диаметра ротора будем изменять высоту h_m магнитов в промежутке от 5 до 20 мм, рассматривая последовательное изменение магнитной индукции в воздушном зазоре, которая влияет на рабочие свойства беспазового вентильного электродвигателя. Найдено, что при высоте постоянных магнитов 11,7 мм индукция магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором БВДМ достигает максимального значения, при котором ЭДС обмотки статора и электромагнитный момент имеют также максимальные значения, соответственно равные 67,59 В и 7,01 Н·м.

На рисунке 4 приведены значения ЭДС обмотки статора и электромагнитных моментов при изменении высоты постоянных магнитов, полученные по формулам (29) и (30).

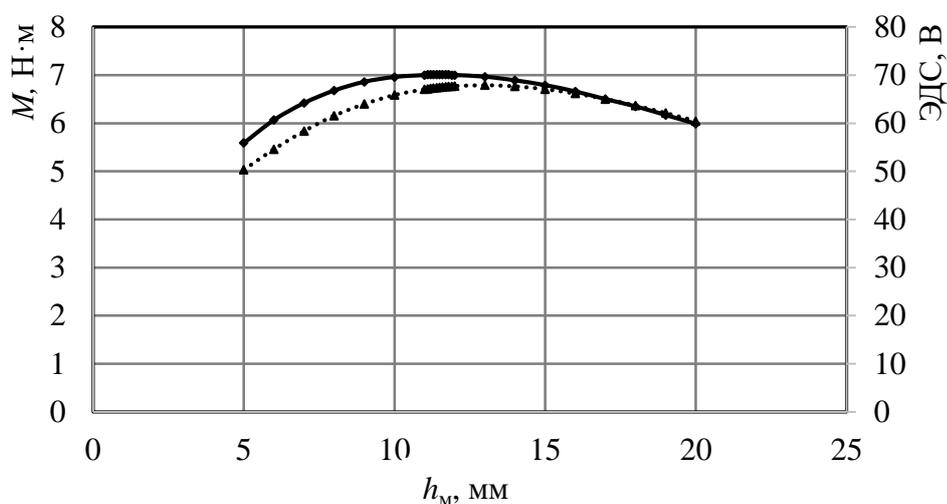


Рисунок 4 – ЭДС обмотки статора (пунктирная линия) и электромагнитный момент (сплошная линия) при изменении высоты магнитов

В диссертационной работе проведен сравнительный анализ электромагнитных потерь и КПД пазового и беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя. Найдено, что 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.

В третьей главе анализируется применение комбинированного провода из меди и железа. Комбинированный провод, 40 % сечения которого принадлежит железной оболочке, более предпочтителен для использования в БВДМ. Разработаны основы теории БВДМ с комбинированным проводом. Исследования показывают, что индукция в активной зоне у БВДМ с комбинированным проводом больше индукции в этой области у БВДМ с медным проводом. Электромагнитный момент БВДМ с комбинированной обмоткой, при прочих равных условиях, может быть в 1,5 раза больше аналогичного момента БВДМ с медной обмоткой и 1,28 раза больше момента ВД с медной обмоткой в пазовом исполнении.

На рисунке 5 показаны виды в разрезе типа оболочки железа и основы железа комбинированного провода.

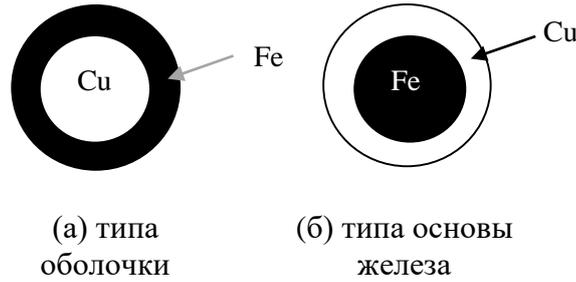


Рисунок 5 – Возможные сечения комбинированного провода

Относительная магнитная проницаемость комбинированного провода, найдена по формуле

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

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

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

$$\tilde{\delta}_{об} = \frac{\delta_{об}}{\mu_r}, \tag{31}$$

где $\delta_{об}$ – реальная толщина этой обмотки,

тогда высота немагнитной полосы у двигателя с комбинированной обмоткой составит

$$\delta_{кп} = \tilde{\delta}_{об} + h_m + \delta_b \tag{32}$$

где h_m , δ_b – соответственно высота магнитов и размер воздушного зазора.

При $\mu_r = 3,5$ получим по формулам (30), (31) расчётное значение немагнитного промежутка (ширины бесконечной полосы) $\delta = 10,59$ мм вместо 15,05 мм при медной обмотке.

При подстановке $\delta_{кп}$ вместо δ в формулы (13), (14), (18) радиальная индукция магнитного поля на поверхности магнитов, вызванная МДС магнитов и током обмотки статора, увеличится соответственно на 40,43 % и 100 %.

Расчёты по формулам (20), (21), (23), (24), (25), (26), (27), (28) показывают, что составляющие индукции магнитного поля на границах воздушного зазора и ярмовых участков и в ярах статора и ротора увеличиваются в разных значений.

Магнитные, механические и добавочные потери БВДМ с комбинированным проводом будут мало отличаться от аналогичных потерь у БВДМ с медным проводом. Электрические потери будут больше у комбинированного провода, имеющего большее активное сопротивление по сравнению с медным проводом, но суммарные потери окажутся меньше потерь в ПВДМ с медной обмоткой при прочих равных условиях, следовательно, КПД у БВДМ с комбинированной обмоткой будет больше КПД у ПВДМ с обычной обмоткой.

Проведено аналогичное исследование влияния вариации магнитной индукции по высоте обмотки статора $\delta_{кп}$ для БВДМ с комбинированным проводом. В

результате, суммарные значения электромагнитных моментов и ЭДС трех слоев будут равны 8,88 Н·м, 82,657 В. Эти показатели, вычисленные для одномерного характера магнитного поля в немагнитном зазоре, имели значения 8,95 Н·м, 83,05 В. Из этих расчётов также можно сделать однозначный вывод, 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 образца БВДМ с комбинированным проводом.

В беспазовом ВД с комбинированным проводом при высоте магнита $h = 11$ мм индукция в воздушном зазоре достигает максимального значения 0,843 Тл. Этому значению индукции будут отвечать величины соответственно электромагнитного момента и ЭДС обмотки статора БВД, подсчитанные по формулам (30) и (29), 9,217 Н·м и 88,167 В.

На рисунке 6 приведены значения ЭДС обмотки статора и электромагнитных моментов при изменении высоты постоянных магнитов, полученные по формулам (29) и (30).

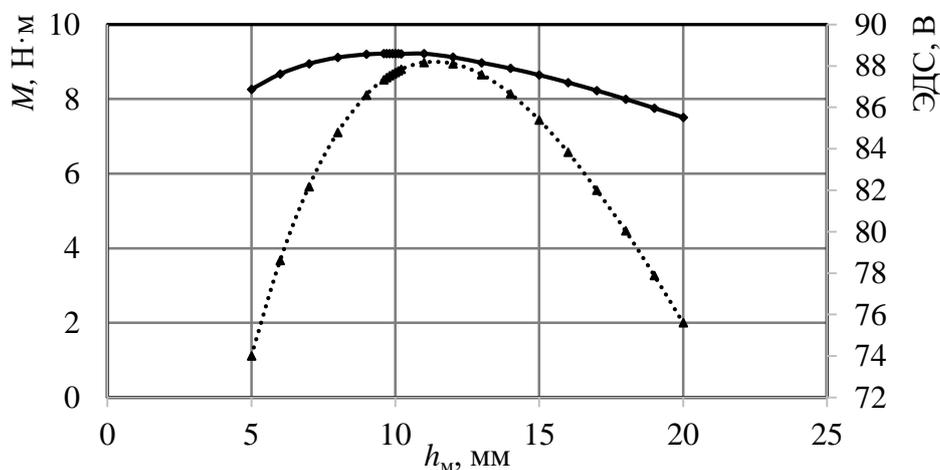


Рисунок 6 – ЭДС обмотки статора (пунктирная линия) и электромагнитный момент (сплошная линия) при изменении высоты магнитов

При изменении высоты магнитов в промежутке с 7 до 13 мм электромагнитный момент БВДМ мало изменяется (оставаясь около 9 Н·м). Если выбираем высоту магнитов $h_m = 7$ мм, то двигатель сохранит практически такой же момент, но будет дешевле и меньше по габаритам.

В четвертой главе представлены конструкция БВДМ (рисунки 7 и 8) и результаты экспериментальных исследований БВДМ медной обмоткой. Определялись длительно допустимые ток I_{do} и момент M_{do} при неподвижном роторе при подаче постоянного тока на две фазы обмотки статора. Полученные результаты приведены в таблице 1

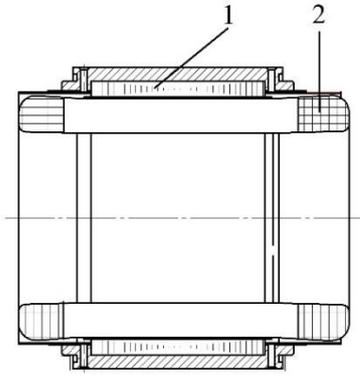


Рисунок 7 – Статора и обмотки беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя: 1 – ярма статора; 2 – беспазовые обмотки;

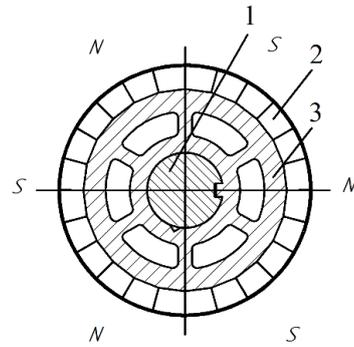


Рисунок 8 – Ротор беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя: 1 – вал ротора; 2 – постоянные магниты; 3 – ярма ротора;

Таблица 1 – Параметры двигателя БВДМ

M_{do} , Н·м	n_{max} , об/мин	U , В	I_{do} , А	E , В	M_{max} , Н·м, не менее
6,25	3000	520	5,0	250	$5M_{do}$

Найдены длительно допустимые моменты БВДМ при изменении скорости вращения ротора (в промежутке от 0 до 3000 об/мин). Сравнительные результаты испытаний БВДМ и аналогичного пазового магнитоэлектрическим вентильном двигателем, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты тепловых испытаний ВД

	ПВДМ			БВДМ			
n , об/мин	0	3000	4500	0	750	1500	3000
M , Н·м	7,0	2,33	0	6,25	5,8	5	4,2

В линейном приближении опытные данные могут быть представлены опытная кривая из опытных точек (рисунок 9) и двух пересекающихся прямых (рисунок 10) с координатами точки пересечения: $M = 5,66$ Нм; $n = 860$ об/мин.

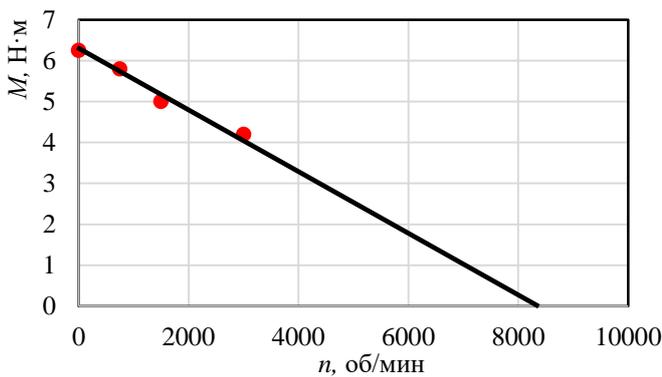


Рисунок 9 – Экспериментальные данные беспазового магнитоэлектрического вентильного двигателя

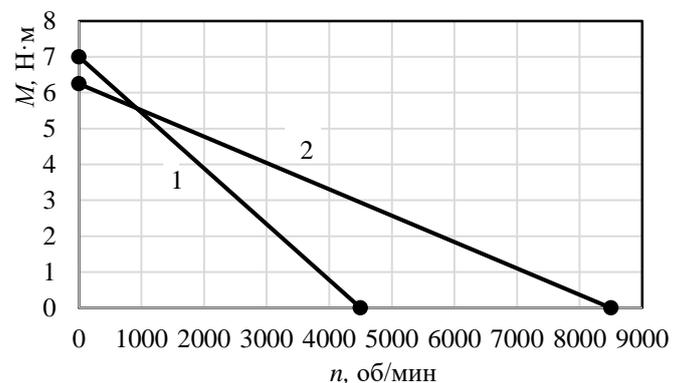


Рисунок 10 – Экспериментальные данные ПВДМ (кривая 1) и БВДМ (кривая 2)

Из рисунка 10 видим, что БВДМ при моментах менее 5,66 Нм может длительно работать со скоростями существенно большими, чем ПВДМ.

Основные выводы и результаты работы

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.

На базе разработанной математической модели возможно проектирование БВДМ с целью их внедрения в отраслях промышленности, транспорта и изучение БВДМ студентами в учебной 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 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 основных работ, опубликованных по теме диссертации

В изданиях их перечня ВАК:

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

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

3. 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.

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

Публикации в других изданиях:

5. 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.

6. Нгуен, К. Т. Беспазовый вентильный двигатель с гибридным проводом / А. А. Афанасьев, К. Т. Нгуен // Электрооборудование: Эксплуатация и ремонт. – 2017. – № 7. – С. 12-17.

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

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

Нгуен Конг Там

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСПАЗОВОГО ВЕНТИЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 09.10.2018 г. формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать оперативная.

Печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № Ц-6223

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии фирма «Крона-2» в форме ООО