

На правах рукописи

Корн-

Корнеев Вячеслав Викторович

**РАСЧЕТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ И ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ
СИНХРОННЫХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И
ДРОБНЫМИ ЗУБЦОВЫМИ ОБМОТКАМИ**

Специальность 05.09.01
«Электромеханика и электрические аппараты»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Приступ Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: **Полищук Владимир Иосифович**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», профессор кафедры Электроснабжения промышленных предприятий.

Киселев Александр Викторович
кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Инженерная школа энергетики, доцент отделения электроэнергетики и электротехники.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж

Защита состоится «20» декабря 2018 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Новосибирского Государственного Технического Университета:

http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=17121

Автореферат разослан «__» ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
К. Т. Н.



Дыбко М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современный период развития электромеханики, мехатроники и электроэнергетики связан с совершенствованием технических показателей и характеристик электрических машин, таких как коэффициент полезного действия, повышение надежности и увеличение ресурса работы, расширением области применения и функциональных возможностей для работы при различных условиях (температура, динамические нагрузки, автономные источники электроэнергетики и т.д.). Одним из перспективных путей решения вышеперечисленных задач является применение электрических машин с постоянными магнитами. Данный класс электрических машин начинает свою историю с 30-х годов прошлого столетия, однако широкое распространение и применение их началось в XXI веке. Распространению синхронных машин с постоянными магнитами способствовало создание и развитие новых материалов для постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов, а также развитие микропроцессорной и полупроводниковой техники. Применение постоянных магнитов с высокими энергетическими показателями позволяет электрическим машинам с возбуждением от постоянных магнитов конкурировать с классическими индукционными (асинхронными) электрическими машинами и машинами с электромагнитным возбуждением. Большой вклад в развитие теории электрических машин с постоянными магнитами внесли ученые Балагуров В.А., Бертинов А.И., Бут Д.А., Галтеев Ф.Ф., Вигриянов П.Г., Ледовский А.Н., Овчинников Е.И., Осин И.Л., Шевченко А.Ф и др.

Несмотря на все более широкое применение синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов и дробными зубцовыми обмотками вопросы их проектирования недостаточно освещены в научно-технической литературе. Особенности конструкций и режимов работы специальных синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов и дробной зубцовой обмоткой для систем автономного электроснабжения и добычи нефти, проектируемые на кафедре электромеханики НГТУ, потребовали как модификации теории и методов проектирования, так и решения ряда задач по уточнению используемых при проектировании коэффициентов.

Классические методики позволяют на основе электромагнитного, теплового, механического расчетов определять геометрические размеры активного объема электрической машины. Традиционные методики базируются на большом опыте разработок и эксплуатации различных типов электромеханических преобразователей энергии и являются надежной базой для проектирования. Строгая логическая структура данных методик является их достоинством. При этом традиционная методика проектирования и расчета геометрии зубцово-пазовой зоны и обмоточных данных базируется на расчетных коэффициентах, зависящих от конфигурации активного объема электрической машины. От выбора данных коэффициентов зависит точность и скорость расчета (количество итераций, затрат времени и средств на моделирование).

Одним из таких коэффициентов является обмоточный. В классических методиках проектирования обмоточный коэффициент рассчитывается при

допущениях, что статор и ротор гладкие, то есть отсутствует зубчатость воздушного зазора, не учитывается насыщение элементов конструкции магнитопровода и перераспределение потоков в воздушном зазоре электрической машины. Такой подход при сравнительно большом количестве зубцов статора, приходящихся на одно полюсное деление, не вносит существенной погрешности в определение обмоточных коэффициентов. Однако, в синхронных машинах с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой, для которых зубцовое деление статора соизмеримо с полюсным делением, обмоточный коэффициент начинает зависеть от величины открытия паза статора.

Наличие широкого спектра пространственных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре машин с дробными зубцовыми обмотками, вращающемся несинхронно с ротором, является причиной возникновения вихревых токов в элементах его конструкции. Количественный состав и амплитуда пульсаций индукции будет увеличиваться при работе синхронной машины с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой на выпрямитель (или от выпрямителя), так как токи становятся менее синусоидальными.

При традиционном подходе к проектированию синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками зачастую не учитывают потери на вихревые токи в магнитах ротора. Пренебрежение данным видом потерь зачастую обусловлено трудностью их определения. Не учет потерь на вихревые токи в магнитах при проектировании электрических машин с постоянными магнитами в определенных случаях может приводить к недопустимому нагреву постоянных магнитов, их размагничиванию и выходу из строя электрической машины или существенному ухудшению ее характеристик.

В соответствии с указанными проблемами были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Целью работы является улучшение эффективности и точности проектирования синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками посредством определения уточненного значения обмоточного коэффициента и добавочных потерь при нагрузке.

Для достижения цели **поставлены следующие задачи:**

1. Определить значения расчетных коэффициентов многополюсных синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками на основе численного моделирования магнитного поля в активном объеме электрической машины.
2. На основании выполненных исследований разработать рекомендации по выбору расчетных коэффициентов с целью повышения качества проектирования электрических машин с дробными зубцовыми обмотками.
3. Провести исследование добавочных потерь на вихревые токи в постоянных магнитах ротора для различных магнитных систем ротора.
4. Разработать методику учета добавочных потерь в синхронных машинах с дробными зубцовыми обмотками.
5. Провести верификацию полученных теоретических результатов методами численного моделирования.

6. Провести разработку многополюсной синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов на основе полученных соотношений и рекомендаций.

Методы исследования

Основные результаты работы получены на базе основных теорем и уравнений электродинамики, метода гармонического анализа и численного расчета магнитного поля методом конечно-элементного анализа. Моделирование магнитного поля в активном объеме электрических машин выполнено методом конечных элементов в двумерной постановке задачи.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается параллельными расчетами различными методами, сравнением результатов решения с результатами других авторов, сопоставлением расчетных и экспериментально полученных зависимостей.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Исследовано, подтверждено и количественно оценено влияние открытия паза статора, геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны, величины воздушного зазора и насыщения магнитной системы на величину обмоточного коэффициента.
2. Получена зависимость величины обмоточного коэффициента от ширины открытия паза статора и величины воздушного зазора для машин с различным числом пазов на полюс и фазу.
3. Разработана аналитическая модель и выражение для определения добавочных потерь на вихревые токи в постоянных магнитах для различных конструкций ротора.

Положения, выносимые на защиту

1. Соотношение для расчета обмоточного коэффициента для синхронных машин с различным числом пазов на полюс и фазу и возбуждением от постоянных магнитов.
2. Аналитическая модель для определения пульсаций магнитной индукции в объеме постоянных магнитов синхронных машин с различными конструкциями ротора.
3. Соотношение для определения добавочных потерь на вихревые токи в постоянных магнитах электрических машин с различными конструкциями ротора и различным числом пазов на полюс и фазу.

Практическая значимость работы

1. Предложены рекомендации по выбору расчетных коэффициентов синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками.
2. Предложено выражение для расчета обмоточного коэффициента для машин с различным числом пазов на полюс и фазу.
3. Предложена аналитическая модель и соотношение для определения добавочных потерь на вихревые токи в постоянных магнитах для различных конструкций ротора.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных семинарах и конференциях: Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2012). Новосибирск. 2012; Студенческая научная конференция «Дни студенческой науки НГТУ-2013». Новосибирск. 2013; Стендовая конференция «Дни студенческой науки НГТУ-2013». Новосибирск. 2013; Конкурс научных студенческих грандов «Дни студенческой науки НГТУ-2013». Новосибирск. 2013; Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2013). Новосибирск. 2013; Двадцатая международная конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва. 2014; 52-я международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс». Новосибирск. 2014; I международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (ЭЭМ-2014). Новосибирск. 2014; городская научно-практическая конференция аспирантов и магистрантов «Progress through Innovations». Новосибирск. 2015.

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 14 печатных работ, в том числе 2 статьи входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ, 12 статей в материалах международных и всероссийских конференций.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 86 наименований, двух приложений, содержит 144 страницы текста, 76 рисунков, 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, описаны методы исследования. Приведены основные положения работы, выносимые на защиту, изложены сведения о научной значимости и практической ценности, апробация работы.

В первой главе выполнен обзор применяемых технических решений в электрических машинах с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой. Описаны важные свойства постоянных магнитов на примере различных материалов и преимущества постоянных магнитов на базе редкоземельных материалов NdFeB (неодим-железо-бор) и SmCo (самарий-кобальт). Также в главе представлено описание различных конструкций роторов и статоров машин с возбуждением от постоянных магнитов. Постоянные магниты, обладающие электрической проводимостью, являются элементами конструкции, подверженными действию полей реакции якоря, которые наводят в теле постоянных магнитов вихревые токи. Одна из составляющих добавочных потерь имеет место при нагрузке и наличии токов в обмотке статора, который возникает как в проводниках обмоток, так и в отдельных стальных частях магнитопровода под воздействием потоков рассеяния, связанных с проводниками обмотки и вызванных током нагрузки. Другая составляющая добавочных потерь имеет место

при холостом ходе, не меняется при нагрузке машины и вызвана неравномерностью воздушного зазора из-за зубчатости. Первый вид называют добавочными потерями при нагрузке, второй – добавочными потерями холостого хода. Представлен обзор существующих методов и способов определения расчетных коэффициентов и добавочных потерь в машинах с дробной зубцовой обмоткой.

Во второй главе проведено исследование и определение расчетного обмоточного коэффициента для синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками с наиболее применяемыми числами пазов на полюс и фазу q , а также рассмотрены возможности применения результатов исследований при проектировании машин данного класса.

Обмоточный коэффициент входит в выражение амплитуды потокосцепления фазы для ν -й гармоники (1).

$$\Psi_{\phi\nu m} = W_{\phi} k_{\text{ов}} \Phi_{\nu m}, \quad (1)$$

где $\Phi_{\nu m} = \frac{2}{\pi} \tau_{\nu} l_{\delta} B_{\nu m}$ – магнитный поток ν -й гармонической магнитного поля на полюсном делении;

τ_{ν} – полюсное деление;

l_{δ} – расчетная длина воздушного зазора;

$B_{\nu m}$ – амплитуда ν -й гармонической индукции магнитного поля;

W_{ϕ} – число последовательно соединённых витков фазы;

$k_{\text{ов}}$ – обмоточный коэффициент для ν -й гармоники.

Как видно из выражения (1) обмоточный коэффициент можно определить следующим образом:

$$k_{\text{ов}} = \frac{\Psi_{\phi\nu m}}{W_{\phi} \Phi_{\nu m}}. \quad (2)$$

Соотношение (2) и было использовано при определении обмоточного коэффициента однозубцовых обмоток машин с постоянными магнитами.

Традиционно, при определении обмоточного коэффициента через ЭДС и амплитуды индукции в воздушном зазоре, принимаются следующие допущения:

- 1) весь поток ν -й гармонической является потоком взаимоиндукции;
- 2) магнитная проницаемость стали равна бесконечности;
- 3) раскрытия пазов бесконечно малы;
- 4) зазор в сравнении с полюсным делением мал и затухание поля ν -й гармонической в зазоре отсутствует;
- 5) проводники обмотки расположены на поверхности гладкого статора.

Однако при данных допущениях, определение обмоточного коэффициента для данного класса машин может происходить с существенными погрешностями, так как у машин с дробными зубцовыми обмотками раскрытие паза и зубцовое деление велики, по отношению к полюсному делению, и оказывают значительное влияние на обмоточный коэффициент.

Поэтому, для более точного расчета обмоточного коэффициента при определении потокосцепления фазы и магнитного потока на полюсном делении, было использовано численное моделирование и построены конечно-элементные модели в программном продукте FEMM с помощью средств встроенного программирования на языке Lua.

Магнитное поле имеет несинусоидальное распределение в воздушном зазоре, что показали результаты численного моделирования. Это обстоятельство потребовало применения разложения в ряд Фурье, по результатам которого были получены значения амплитуды магнитной индукции и потокосцепления v -й рабочей гармонической магнитного поля. Результаты расчета обмоточного коэффициента посредством соотношения (2) представлены на рисунке 1. Кривые представлены в зависимости от относительного открытия паза статора, которое представляет собой соотношение ширины шлица паза статора $b_{щ1}$ к зубцовому шагу статора t_1 .

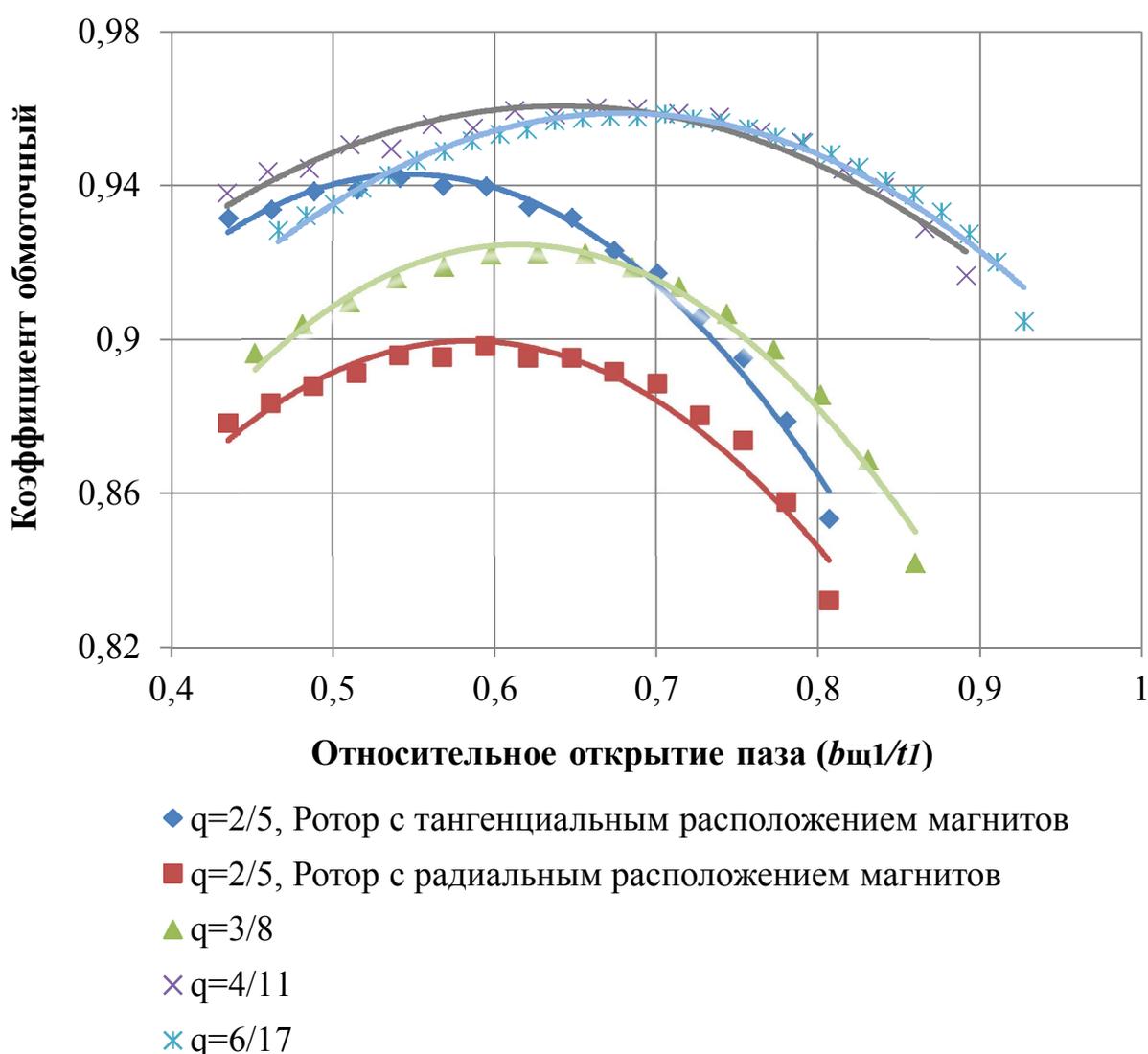


Рисунок 1 – Зависимости обмоточного коэффициента дробных зубцовых обмоток от относительного открытия паза для различных значений числа пазов на полюс и фазу при «реальной» геометрии электрической машины.

Изменение величины обмоточного коэффициента связано с влиянием реальной геометрии активного объема электрической машины и свойствами материалов. В первую очередь изменения обусловлены не синусоидальностью распределения магнитной индукции от постоянных магнитов и потоками рассеяния, замыкающимися через коронки зубцов статора и воздушный зазор. Кроме этого, на распределение напряженности магнитного поля влияют свойства листов стали магнитопровода статора. При значении относительного открытия паза на уровне 0,3 достигается максимальное значение обмоточного коэффициента для исследуемых синхронных машин с постоянными магнитами и дробно-зубцовыми обмотками. При дальнейшем увеличении ширины шлица паза статора происходит возрастание потоков дифференциального рассеяния и уменьшение обмоточного коэффициента.

Как видно из зависимостей, обмоточный коэффициент зависит от величины открытия паза и изменяется на 10 %. При этом максимальные значения рассчитанных обмоточных коэффициентов, соответствующие оптимальному открытию паза статора, практически равны рекомендуемым значениям обмоточных коэффициентов, которые получены аналитически через амплитуду рабочей гармоники индукции и при допущении равномерного воздушного зазора и магнитной проницаемости магнитопровода статора равной бесконечности.

Результаты определения обмоточного коэффициента могут использоваться при проектировании синхронных машин с дробными зубцовыми обмотками и постоянными магнитами. Целесообразно при проектировании синхронных машин с дробными зубцовыми обмотками и возбуждением от постоянных магнитов

выбирать величину открытия пазов статора из соотношения $\frac{b_{ш1}}{t_1} = 0,25 - 0,35$.

При указанном соотношении получают максимальные значения обмоточных коэффициентов, что позволит получить большую мощность при тех же главных размерах машины. Выбор больших значений открытий пазов статора будет приводить к ухудшению показателей проектируемой машины из-за потоков рассеяния, а также увеличению моментов «залипаний» ротора с постоянными магнитами.

Также в третьей главе получено соотношение (3) для расчета обмоточного коэффициента синхронных машин с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой на статоре. Соотношение (3) получено аппроксимацией методом наименьших квадратов в виде степенной функции зависимостей обмоточного коэффициента от относительного открытия паза статора и представленных на рисунке 1. Формула (3) предназначена для нахождения уточнённого значения обмоточного коэффициента, так как выведенная формула предполагает зависимость обмоточного коэффициента от геометрических размеров, определение которых происходит при непосредственном использовании данного коэффициента. Поэтому предлагается способ, при котором изначально производится расчет геометрических размеров активного объема синхронной машины с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой на статоре с использованием значения обмоточного коэффициента, полученного через

амплитуды рабочей гармоники индукции для определенного числа пазов на полюс и фазу. После определения геометрических размеров активного объема электрической машины производится уточняющий расчет обмоточного коэффициента посредством выражения (3).

Значения коэффициентов A_k , B_k и C_k для обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q=6/17$ представлены на рисунках 2, 3 и 4. Результаты расчета обмоточного коэффициента для обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q=6/17$ представлены на рисунке 5.

$$k_o = -A_k \left(\frac{b_{\text{ш1}}}{t_1} \right)^2 + B_k \frac{b_{\text{ш1}}}{t_1} + C_k, \quad (3)$$

где A_k , B_k и C_k – коэффициенты, которые зависят от числа пазов на полюс и фазу q и величины воздушного зазора между статором и ротором;
 $b_{\text{ш1}}$ – величина открытия паза статора (ширина шлица паза);
 t_1 – зубцовый шаг на статоре.

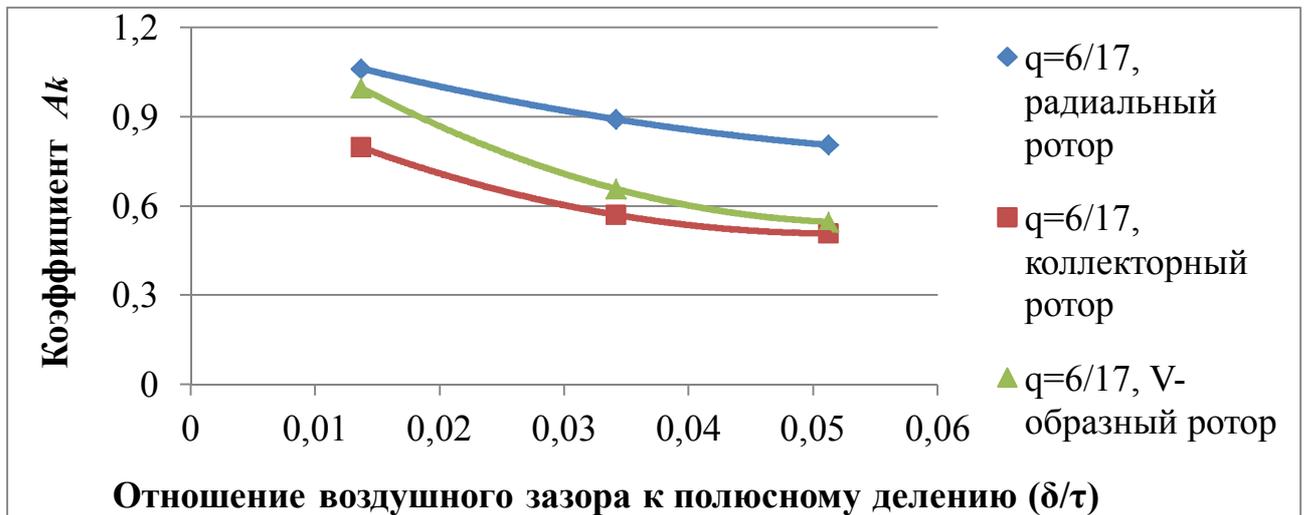


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента A_k от отношения величины воздушного зазора к полюсному делению

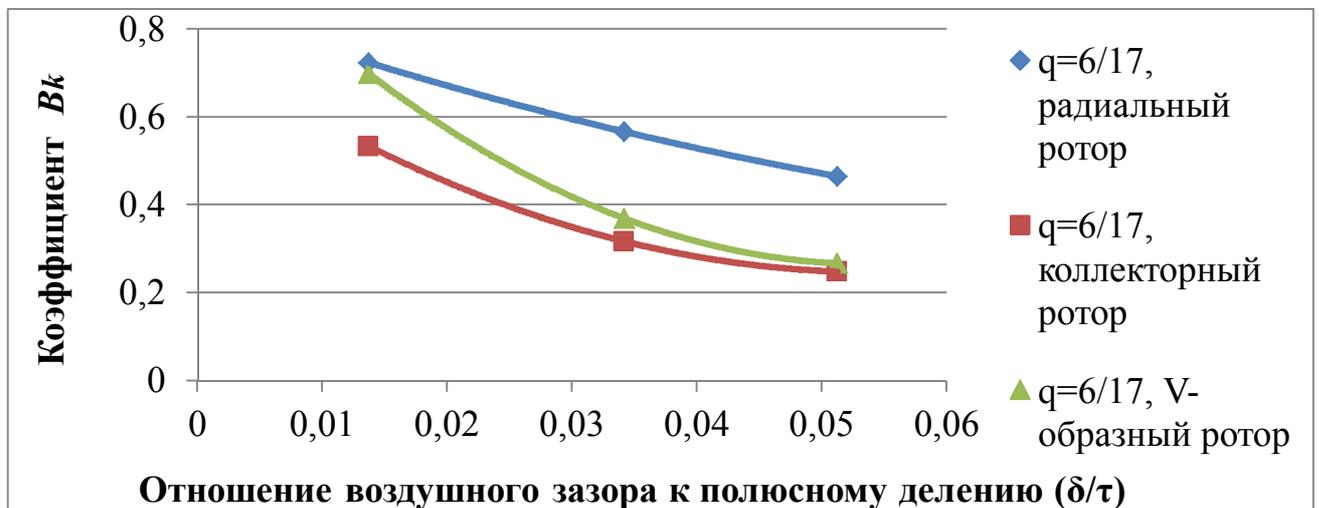


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента B_k от отношения величины воздушного зазора к полюсному делению

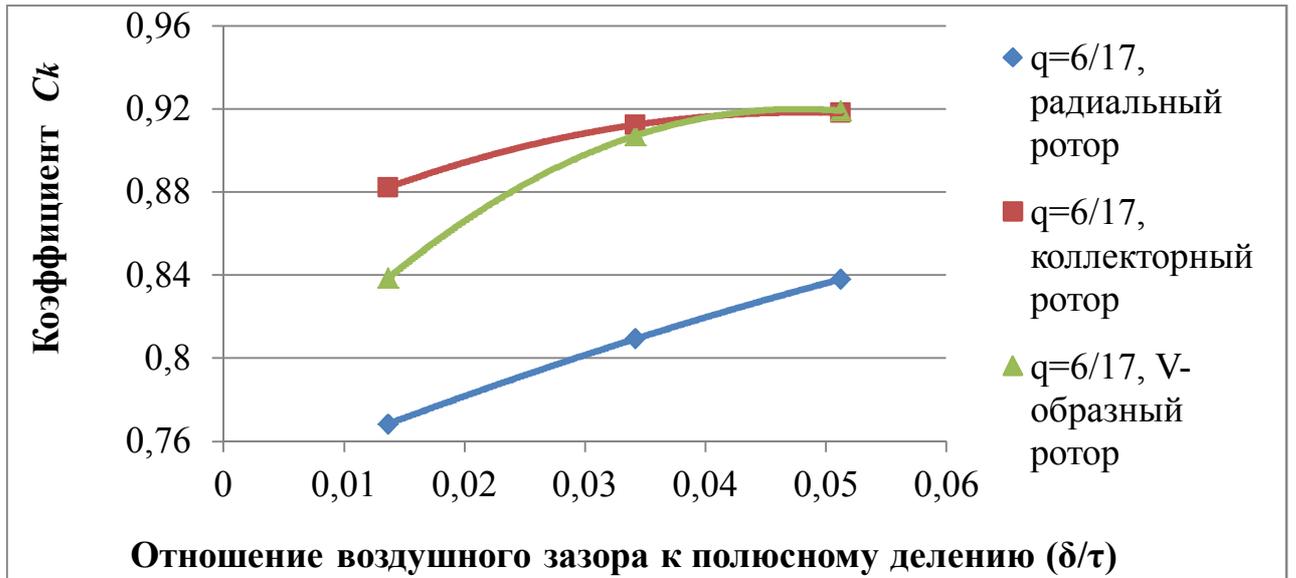
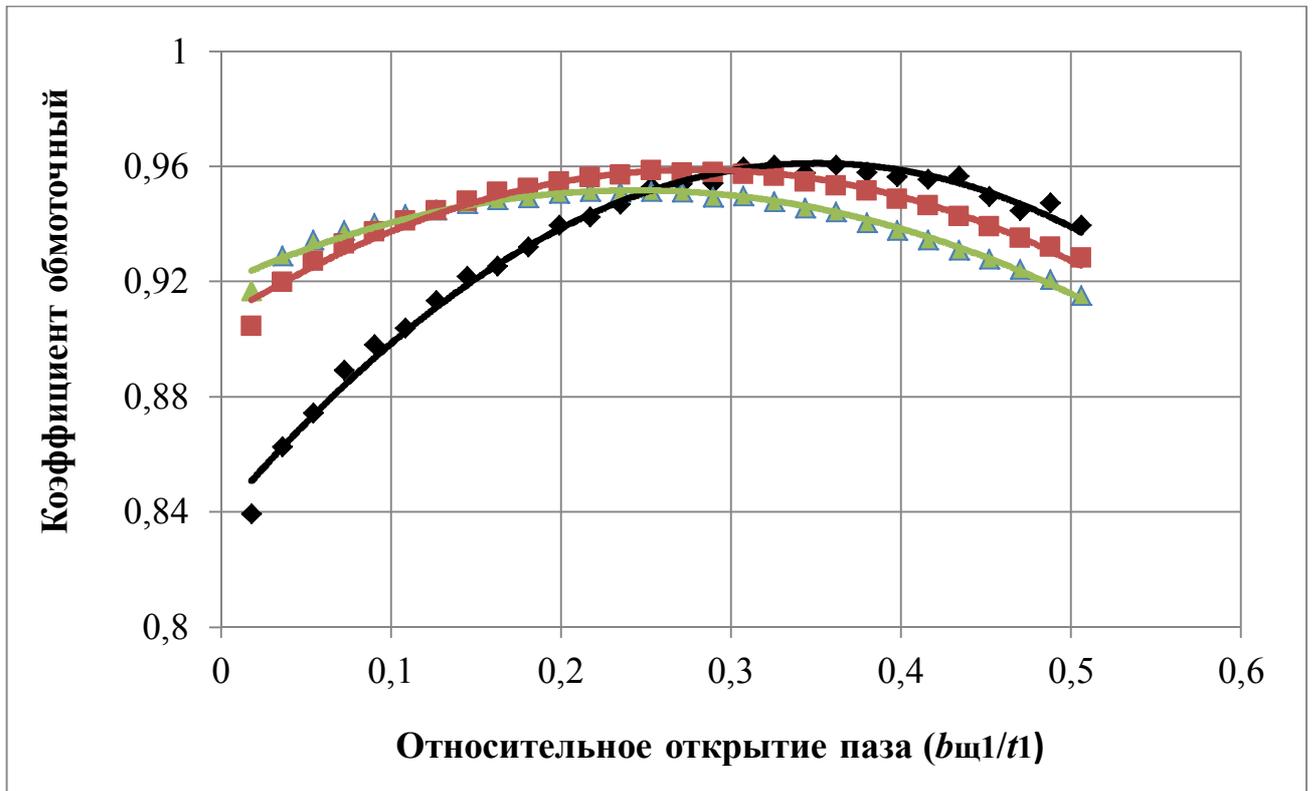


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента C_k от отношения величины воздушного зазора к полюсному делению



Расчетные значения:

◆ - $q=6/17, \delta/\tau=0,013$

■ - $q=6/17, \delta/\tau=0,034$

▲ - $q=6/17, \delta/\tau=0,051$

Аппроксимированные значения:

— - $q=6/17, \delta/\tau=0,013$

— - $q=6/17, \delta/\tau=0,034$

— - $q=6/17, \delta/\tau=0,051$

Рисунок 5 - Зависимости обмоточного коэффициента от относительного открытия паза при различных значениях воздушного зазора для обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q=6/17$

Расчеты, произведенные методом конечно элементного анализа, показали, что обмоточный коэффициент зависит от геометрических размеров, используемых в формуле (3). Расчеты производились для дробных зубцовых обмоток с наиболее используемыми числами пазов на полюс и фазу q , таких как $2/5$, $3/8$, $4/11$, $6/17$. Результаты расчета методом конечно элементного анализа и с использованием формулы (3) представлены на рисунке 5.

Рисунок 5 показывает, что графики аппроксимированной функции обмоточного коэффициента имеют хорошее совпадение с результатами численного моделирования. Погрешность в определение обмоточного коэффициента с помощью аппроксимированного выражения (3) по сравнению с результатами численного моделирования составляет $0,025 - 1 \%$.

Третья глава посвящена исследованию добавочных потерь на вихревые токи в постоянных магнитах и влиянию различных параметров на данный вид потерь. При работе электрической машины на магнитное поле постоянных магнитов оказывают влияние пространственные и временные гармоники, обусловленные зубцово-пазовой структурой магнитопроводов статора и ротора, а также полем реакции якоря. Это изменение магнитного поля служит причиной возникновения вихревых токов и соответствующих потерь в магнитах ротора, обладающих достаточно высокой электрической проводимостью. Потери от этих токов вызывают как дополнительный нагрев магнитов, так и общее повышение потерь в машине.

Проведенные исследования показали, что потери на вихревые токи в постоянных магнитах ротора образуются как при использовании конструкций с внешним расположением магнитов, так с внутренним расположением магнитов. По результатам численного моделирования активного объема синхронных машин с различными конструкциями роторов с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой на статоре можно отметить, что большее влияние на величину потерь на вихревые токи в постоянных магнитах оказывают гармоники, вызванные полем реакции якоря, чем пространственные гармоники, обусловленные зубчатостью статора. Гармоники, вызванные зубцово-пазовой структурой рассматриваемых электрических машин, имеют значительно меньшую амплитуду пульсаций по сравнению с гармониками от поля реакции якоря.

Очевидно, что для расчета потерь от вихревых токов в магнитах необходима информация о пульсациях магнитного поля в объеме постоянных магнитов. Данная задача является одной из важнейших при определении потерь на вихревые токи и достаточно сложной. В литературных источниках определение индукции в объеме постоянных магнитов и других элементах конструкции при нахождении потерь на вихревые токи производится с помощью метода конечно-элементного анализа и современных компьютерных средств автоматизированного проектирования. Следует заметить, что применение численного моделирования на этапе выбора геометрии машины и ее элементов не очень удобно и занимает значительное количество времени и вычислительных ресурсов. Предпочтительнее использование аналитических методов расчета на

первоначальном этапе для оценки потерь на вихревые токи при расчете и разработке конструкции электромеханического преобразователя энергии.

На основании вышесказанного, в третьей главе работы рассматривались аналитические способы определения добавочных потерь на вихревые токи. Данный способ основан на использовании каскадных схем замещения. В третьей главе рассмотрено синтезирование каскадных схем замещения для определения пульсаций магнитной индукции в объеме постоянных магнитов от поля реакции якоря.

В отличие от классической теории при синтезировании схемы замещения не производилось предварительное разделение магнитного потока на отдельные составляющие, такие как основной поток и потоки рассеяния, а так же предварительное определение путей их замыкания. Существующая теория, анализ экспериментальных и теоретических работ в области исследования электрических машин, а также поставленные условия позволяют сформировать следующие основные допущения и предпосылки:

1. В активном объеме машины существует единое двухмерное электромагнитное поле. Во всех конструктивных зонах находятся электромагнитные поля с взаимными связями.

2. Теоретически активный объем машины рассматривается в виде совокупности сплошных зон-полос с параллельными границами, каждая из которых обладает усредненными однородными (ярма, воздушный зазор и зубцово-пазовые структуры) в общем случае с анизотропными физическими свойствами.

3. Источниками магнитного поля являются электрические токи, сосредоточенные в пазах статора и ротора.

В результате синтеза получена каскадная схема замещения, представленная на рисунке 6. Необходимость расчета параметров полученной каскадной схемы замещения потребовала рассмотрения вопросов определения сторонней плотности тока, моделирующую МДС реакции якоря и эквивалентных усредненных магнитных проницаемостей отдельных конструктивных зон. Формулы для определения сторонней плотности тока для наиболее используемых дробных зубцовых обмоток представлены в таблице 1.

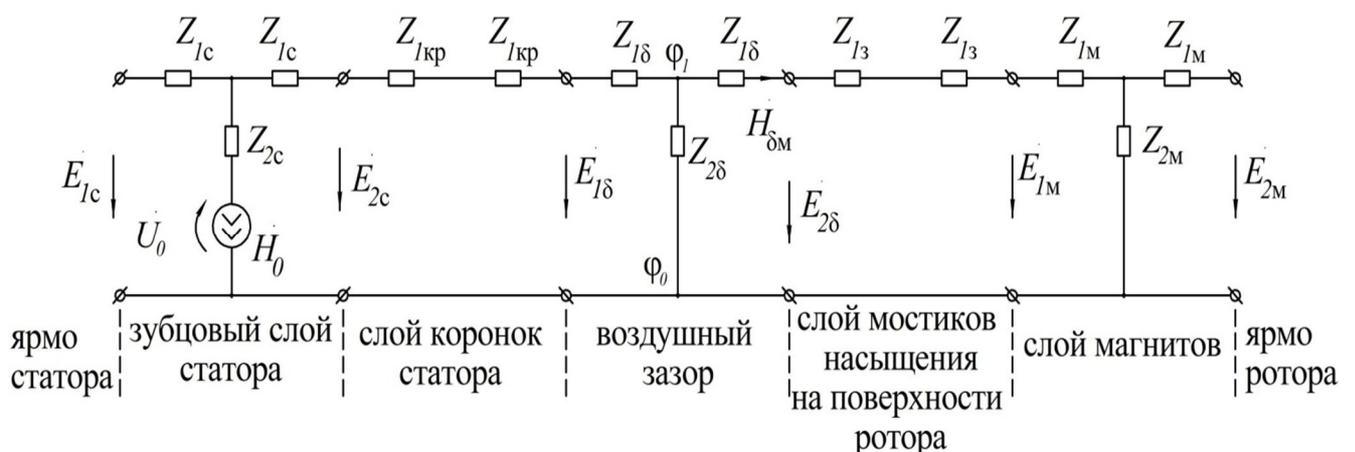


Рисунок 6 – Каскадная схема замещения для синхронной машины с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой

При определении параметров схемы замещения были сделаны следующие допущения, что каждая среда (зубцово-пазовые зона, ярма ротора и статора) обладает различными усредненными физическими свойствами (магнитными проницаемостями) на зубцовом делении в различных направлениях.

Таблица 1 – Сторонние плотности тока для трехфазных обмоток

Обмоточные данные	Сторонняя плотность тока
$q=1/2,$ 6 пазов	$\frac{2I_{\phi}W_{\kappa}Z_1m' \frac{t_1}{b_{\text{ПС}}}}{\pi^2 D_i h_c \lambda} \left(2 \cos\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) - \cos\left(\frac{\pi}{3}\lambda\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{3}\lambda\right) \right)$
$q=2/5,$ 12 пазов	$\frac{2I_{\phi}W_{\kappa}Z_1m' \frac{t_1}{b_{\text{ПС}}}}{\pi^2 D_i h_c \lambda} \left(2 \cos\left(\frac{5\pi}{12}\lambda\right) - 2 \cos\left(\frac{7\pi}{12}\lambda\right) - \cos\left(\frac{\pi}{3}\lambda\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\lambda\right) \right)$
$q=3/8,$ 18 пазов	$\frac{2I_{\phi}W_{\kappa}Z_1m' \frac{t_1}{b_{\text{ПС}}}}{\pi^2 D_i h_c \lambda} \times \left(\left(\sqrt{2 \sin\left(\frac{7\pi}{18}\lambda\right) - 2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) + 2 \sin\left(\frac{11\pi}{18}\lambda\right) - \sin\left(\frac{\pi}{3}\lambda\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{3}\lambda\right)} \right)^2 + \left(\sqrt{2 \cos\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) - 2 \cos\left(\frac{7\pi}{18}\lambda\right) - 2 \cos\left(\frac{11\pi}{18}\lambda\right) + \cos\left(\frac{\pi}{3}\lambda\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\lambda\right)} \right)^2 \right)$
$q=4/11,$ 24 паза	$\frac{2I_{\phi}W_{\kappa}Z_1m' \frac{t_1}{b_{\text{ПС}}}}{\pi^2 D_i h_c \lambda} \left(2 \cos\left(\frac{3\pi}{8}\lambda\right) - 2 \cos\left(\frac{11\pi}{24}\lambda\right) + 2 \cos\left(\frac{13\pi}{24}\lambda\right) - \right. \\ \left. - 2 \cos\left(\frac{5\pi}{8}\lambda\right) - \cos\left(\frac{\pi}{3}\lambda\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\lambda\right) \right)$
$q=6/17,$ 36 пазов	$\frac{2I_{\phi}W_{\kappa}Z_1m' \frac{t_1}{b_{\text{ПС}}}}{\pi^2 D_i h_c \lambda} \left(2 \cos\left(\frac{13\pi}{36}\lambda\right) - \cos\left(\frac{\pi}{3}\lambda\right) - 2 \cos\left(\frac{15\pi}{36}\lambda\right) + 2 \cos\left(\frac{17\pi}{36}\lambda\right) - \right. \\ \left. - 2 \cos\left(\frac{19\pi}{36}\lambda\right) + 2 \cos\left(\frac{21\pi}{36}\lambda\right) - 2 \cos\left(\frac{23\pi}{36}\lambda\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\lambda\right) \right)$
Диам-ная трехфазная обмотка, 1-я гармоника	$\frac{18I_{\phi}W_{\phi}}{\pi^2 D_i h_c}$

Усреднение физических свойств составных зон производилось на основании равенства магнитных сопротивлений, приходящихся на зубцовое деление, в реальной и моделируемой среде для стационарных полей. Этот критерий логически обоснован и экспериментально подтвержден специальными исследованиями на физических моделях, рассмотренных в работах А. И. Инкина.

Определение эквивалентных усредненных магнитных проницаемостей (μ_x и μ_y) по направлениям осей координат x и y , для различных конструкций роторов с постоянными магнитами производилось при известной магнитной проницаемости стали зубца и геометрии зубцово-пазовой зоны электрической машины.

Применив теорию цепей, было получено значение электрической напряженности E_{1M} . Согласно применяемого в каскадных схемах замещения выражения (4) получаем значение амплитуды пульсации магнитной индукции в объеме постоянных магнитов.

$$B = -\frac{\alpha}{j\omega} E, \quad (4)$$

где $\alpha = \frac{\pi}{\tau}$;

ω – угловая частота вращения поля;

τ – полюсное деление;

E – напряженность электрического поля.

Определение магнитной индукции в объеме постоянных магнитов является одной из задач расчета потерь на вихревые токи. Далее в третьей главе работы были рассмотрены выводы выражений для потерь на вихревые токи.

Рассмотрим постоянный магнит со сторонами, равными $2a$ и $2b$, и толщиной h , которое пронизывает поле, как показано на рисунке 7.

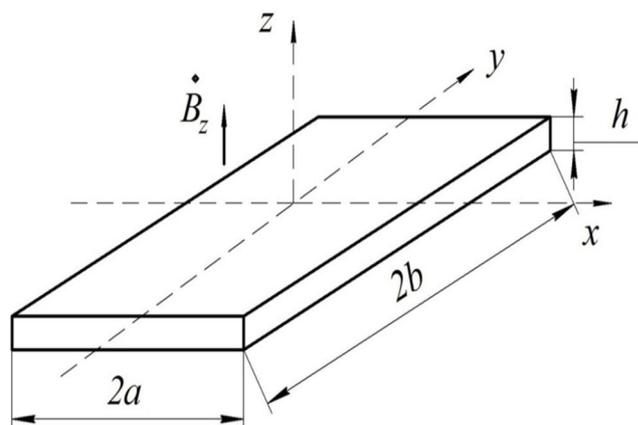


Рисунок 7 – Постоянный магнит в магнитном поле

Расчет вихревых токов сводится к решению краевой задачи для уравнения Пуассона (5) в прямоугольной области, которое было найдено в виде двойного ряда Фурье.

$$\frac{\partial^2 \dot{u}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{u}_z}{\partial y^2} = -j\omega\gamma \dot{B}_z, \quad (5)$$

где γ – удельная объемная проводимость.

После чего составляющие плоскости вихревых токов через функцию \dot{u} могут быть получены как

$$\dot{\delta}_x = \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial y}, \quad \dot{\delta}_y = -\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial x}. \quad (6)$$

Представим искомую функцию \dot{i}_z и правую часть уравнения (5) в виде разложения в двойные тригонометрические ряды Фурье по косинусам

$$\dot{i}_z(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \dot{A}_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{2b}\right), \quad (7)$$

$$-j\omega\gamma\dot{B}_z = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \dot{F}_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{2b}\right). \quad (8)$$

В результате, составляющие плоскости тока и потери на вихревые токи в постоянных магнитах определяем с помощью формулы расчета мощности потерь, которая была преобразована к следующему виду:

$$P = \left[\int_{-a}^a \int_{-b}^b \left(|\dot{\delta}_x(x, y)|^2 + |\dot{\delta}_y(x, y)|^2 \right) \right] \cdot \frac{h}{2\gamma}. \quad (9)$$

Прямой расчет потерь на вихревые токи в постоянном магните по формуле (9) возможен с использованием численного интегрирования. Была проведена аппроксимация зависимостей потерь и выведена упрощенная формула для расчета потерь на вихревые токи:

$$P = \frac{B_z^2 h \gamma \omega^2 a^3 b}{1,46 \frac{a^2}{b^2} + 0,537 \frac{a}{b} + 1,55}. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет рассчитывать потери на вихревые токи в роторах с постоянными магнитами, как с внутренним, так и с внешним расположением постоянных магнитов. Погрешность использования аппроксимированной формулы для расчета добавочных потерь на вихревые токи не более 0,5 %.

Для проверки полученных аналитических соотношений было произведено определение магнитной индукции в объеме постоянных магнитов с использованием численных методов на примере конкретной геометрии разрабатываемых электрических машин, которые подтвердили правильность аналитических выводов. Сравнение результатов аналитического и численного расчета представлено в таблице 2. Проведены исследования влияния режимов работы и конструкции электрических машин на величину потерь на вихревые токи в постоянных магнитах.

Результаты проведенных исследований показывают, что пульсации магнитного поля в объеме постоянных магнитов наводят в них вихревые токи, обуславливающие увеличение добавочных потерь при работе под нагрузкой синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками.

При необходимости уменьшения потерь, как постоянных магнитов, так и электрической машины в целом могут быть приняты следующие меры:

- Сегментирование или деление магнитов на несколько частей;

- Оптимизация ширины открытия паза и формы коронок статора электрических машин с постоянными магнитами с целью снижения зубцовых гармоник проводимости воздушного зазора машины.

Таблица 2 – Сравнение результатов

	Амплитуда магнитной индукции в объеме постоянного магнита	
	Численное моделирование	Аналитические выводы (с использованием каскадных схем замещения)
q=6/17, 36 пазов, ротор с V-образными магнитами	0,05 Тл	0,059 Тл
Диаметральная обмотка, q=2, 12 пазов, ротор с внешним расположением магнитов	0,061 Тл	0,069 Тл

В четвертой главе рассмотрено моделирование работы синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками на примере генератора аварийного динамического торможения грузоподъемного механизма, разработанного на кафедре электромеханики НГТУ. Особенности проектируемых электрических машин и конкретного образца потребовали моделирования работы генератора совместно с выпрямителем для определения рабочих характеристик. В результате моделирования получены временные гармоники тока, вызванные выпрямителем, и рассмотрено влияние данных гармоник на потери от вихревых токов. Результаты испытаний подтвердили правильность принятых решений.

В заключении представлены основные результаты работы, направленные на решение вопросов проектирования:

1. На основании расчета магнитного поля синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками определено, что значение расчетного обмоточного коэффициента дробных зубцовых обмоток зависит от величины открытия паза статора. При исследовании влияния зубчатости статора обнаружено уменьшение потокосцепления и изменение величины обмоточного коэффициента при увеличении открытия паза. Выявлено влияние на обмоточный коэффициент дробных зубцовых обмоток величины открытия паза и воздушного зазора, что не учитывается при общепринятых допущениях. Изменение обмоточного коэффициента составляет 10%.

2. По результатам исследований, показана зависимость величины обмоточного коэффициента дробных зубцовых обмоток при рассмотрении реальной геометрии. Как установлено по результатам исследований, на величину обмоточного коэффициента влияет ширина открытия паза, воздушный зазор, насыщение магнитопровода. В классической теории значение обмоточного коэффициента определяется без учета величины открытия паза и воздушного зазора через амплитуду рабочей гармоники индукции. При этом только максимальные значения зависимости обмоточного коэффициента дробных

зубцовых обмоток от открытия паза имеют близкие значения с классическими величинами, полученными аналитическим способом с допущениями.

3. По результатам выполненных расчетов получены зависимости обмоточного коэффициента дробных зубцовых обмоток от относительного открытия паза (отношения ширины шлица паза к зубцовому шагу) и величины воздушного зазора. Результаты представлены для наиболее часто используемых чисел пазов на полюс и фазу в машинах с дробными зубцовыми обмотками. Полученные результаты могут использоваться при проектировании синхронных машин с дробными зубцовыми обмотками различных мощностей.

4. Предложено соотношение для расчета величины обмоточного коэффициента дробных зубцовых обмоток с различными значениями числа пазов на полюс и фазу. Расчет обмоточного коэффициента с помощью предложенного соотношения имеет погрешность, не превышающую 1 %. Предложенная формула позволяет произвести определение расчетного обмоточного коэффициента на этапе выбора геометрических и обмоточных данных электрической машины без применения средств численного моделирования.

5. Предложен аналитический способ определения пульсации магнитной индукции в объеме постоянных магнитов для синхронных машин с различными конструкциями роторов и различным значением числа пазов на полюс и фазу q дробных зубцовых обмоток на статоре. Данный способ позволяет рассматривать влияние поля реакции якоря.

6. Численными методами исследовано влияния пространственных и временных гармоник на величину пульсаций магнитной индукции в воздушном зазоре и объеме постоянных магнитов, а также влияние данных гармоник на величину добавочных потерь на вихревые токи в постоянных магнитах. Результаты конечно элементного анализа подтвердили возможность и правомерность использования предложенного аналитического способа расчета магнитной индукции в объеме постоянных магнитов синхронных машин с дробной зубцовой обмоткой. Проведенные исследования показывают, что на величину пульсаций магнитной индукции в объеме постоянных магнитов большее влияние имеет поле реакции якоря, чем влияние зубчатости статора.

7. Получены выражения для определения величины добавочных потерь на вихревые токи в постоянных магнитах.

8. Проведены экспериментальные исследования добавочных потерь на вихревые токи в постоянных магнитах.

9. Выполнено проектирование генератора аварийного динамического торможения грузоподъемного механизма. Принято активное участие в изготовлении и испытании генератора аварийного динамического торможения грузоподъемного механизма, выполненного в соответствии с результатами проектирования. Полученные экспериментальные данные подтвердили правильность принятых решений при проектировании и показали совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Основные положения работы отражены в следующих публикациях:

Научные публикации по теме работы в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Корнеев, В. В. Особенности конструкции и проектирования энергоэффективных магнитоэлектрических электродвигателей общепромышленного назначения / А. Ф. Шевченко, А. Г. Приступ, О. И. Новокрещенов, Д. М. Топорков, В. В. Корнеев // Электротехника. – 2014. – №12. – С. 41.
2. Корнеев, В. В. Потери на вихревые токи в магнитах ротора генератора аварийного динамического торможения / А. Г. Приступ, В. В. Корнеев // Электро. Электротехника, Электроэнергетика, Электротехническая промышленность. – 2016. – №3. – С. 21.

Другие научные публикации по теме работы:

3. Корнеев, В. В. Использование программного пакета SPEED для расчета магнитоэлектрических двигателей / В. В. Корнеев, А. Г. Приступ // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2012. – Ч. 5. – С. 301.
4. Корнеев, В. В. Особенности расчёта двигателей с постоянными магнитами при помощи пакета SPEED / В. В. Корнеев, А. Г. Приступ // Электроэнергетика: восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: материалы конференции. В 7 т. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2013. – Т. 3. – Ч. 2. – С. 49.
5. Корнеев, В. В. Проектирование генератора для беспилотного летательного аппарата / В. В. Корнеев, А. Г. Приступ // Электроэнергетика: восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: материалы конференции. В 7 т. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2013. – Т. 3. – Ч. 2. – С. 45.
6. Корнеев, В. В. Проектирование синхронного генератора с постоянными магнитами / В. В. Корнеев, А. Г. Приступ // Технические науки – от теории к практике: сборник статей по материалам 23-й международной заочной научно-практической конференции. - Новосибирск: Изд. «СибАК». – 2013. – С. 106.
7. Корнеев, В. В. Особенности проектирования магнитоэлектрических машин с дробно-зубцовыми обмотками / В. В. Корнеев, А. Г. Приступ // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 10 ч.– Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2013. – Ч. 6. – С. 114.
8. Корнеев, В. В. Проектирование синхронных машин с постоянными магнитами / В. В. Корнеев, А. Г. Приступ // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцатая международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Тез. докл. В 4 т. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2014. – Т. 2. – С. 137.
9. Корнеев, В. В. Расчетные коэффициенты синхронных машин с постоянными магнитами и дробно-зубцовыми обмотками / В. В. Корнеев, А. Г. Приступ // материалы 52-й международной научной студенческой конференции МНСК-

- 2014: Мехатроника и автоматизация. – Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т. – 2014. – С.50.
10. Корнеев, В. В. Расчетные коэффициенты синхронных машин с постоянными магнитами и дробно-зубцовыми обмотками / В. В. Корнеев, А. Г. Приступ // Современные проблемы технических наук: сб. тез. докл. Новосиб. межвуз. науч. студен. конф. «Интеллектуальный потенциал Сибири». – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). – 2014. – Ч. 3. – С. 115.
 11. Корнеев, В. В. Энергоэффективные магнитоэлектрические электродвигатели общепромышленного назначения / А. Ф. Шевченко, А. Г. Приступ, О. И. Новокрещенов, Д. М. Топорков, В. В. Корнеев // Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты (МКЭЭЭ–2014): тр. 15 междунар. конф., Крым, Алушта, 21–27 сент. 2014 г. – [Б. м.: б. и.]. – 2014. – С. 75.
 12. Корнеев, В. В. Обмоточный коэффициент синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками / В. В. Корнеев, А. Г. Приступ // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: в 3 ч.: сборник научных трудов I международной научной конференции молодых ученых / коллектив авторов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2014. – Ч. 1. – С.24.
 13. Korneev, V. V. Winding factor of permanent magnet synchronous machines with fractional slot concentrated windings / V. V. Korneev, A. G. Pristup, O. E. Gubareva // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698 : Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 73. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.73.
 14. Korneev, V. V. To the question of determining winding factor of permanent magnet synchronous machines with fraction slot concentrated windings / В. В. Корнеев, А. Г. Приступ // Progress through Innovations: тезисы научно-практической конференции аспирантов и магистрантов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2015. – С. 61.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16, объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.
заказ № 1367, подписано в печать 09.10.2018 г.