

На правах рукописи



Топорков Дмитрий Михайлович

**ЗУБЦОВЫЕ ПУЛЬСАЦИИ МОМЕНТА В МАШИНАХ С ДРОБНЫМИ  
ОБМОТКАМИ И ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ**

Специальность 05.09.01  
«Электромеханика и электрические аппараты»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск 2016

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Шевченко Александр Федорович**

Официальные оппоненты: **Беспалов Виктор Яковлевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», профессор кафедры  
электромеханики

**Цукублин Анатолий Борисович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,  
доцент кафедры электротехнических  
комплексов и материалов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Южно-  
Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Защита состоится 26 мая 2016 года в 10<sup>00</sup> ч на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете 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=15441](http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=15441)

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Неyman Владимир Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов применяются в основном в системах регулируемого электропривода, поэтому развитие полупроводниковой и микропроцессорной техники, появление *MOSFET* и *IJBТ*-транзисторов, обусловившее увеличение быстродействия и мощности систем управления, предопределило применение машин с постоянными магнитами в новых областях. Использование для возбуждения машин высококоэрцитивных редкоземельных магнитов исключает электрические потери на возбуждение, а высокая удельная магнитная энергия позволяет выполнять машины, которые обладают лучшими массогабаритными показателями при прочих равных условиях.

Отдельным подклассом можно выделить машины с дробными зубцовыми обмотками. Применение таких обмоток уменьшает расход меди и осевую длину корпуса двигателя за счет уменьшения длины лобовой части и упрощает технологию укладки, т.к. каждая катушка охватывает один зубец статора.

Во многих электроприводах требуются электрические машины с низким уровнем пульсаций момента, которые могут возникать по целому ряду причин: зубчатого строения воздушного зазора, несинусоидальности питающего напряжения, ступенчатого распределения кривой магнитодвижущей силы (м.д.с.), и т.д. В электрических машинах с постоянными магнитами к этим причинам добавляются дополнительные моменты, вызванные взаимодействием магнитного поля магнитов с переменной проводимостью воздушного зазора, обусловленной зубчатостью статора. Эти дополнительные моменты называют зубцовыми пульсациями момента.

Зубцовые пульсации момента могут приводить к вибрациям и шуму в процессе работы машины, уменьшать точность позиционирования при использовании в прецизионных приводах. Эти паразитные моменты присутствуют и при обесточенной обмотке и могут быть нежелательными даже тогда, когда машина не работает. Например, в приводе электрического усилителя рулевого управления наличие этого эффекта приводит к тому, что на рулевом колесе ощущаются «залипания» ротора, что снижает комфортность управления и увеличивает физическое напряжение водителя. Практика разработки машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками показывает, что амплитуда зубцовых пульсаций момента может составлять несколько процентов от развиваемого электромагнитного момента.

Кроме того, дефекты в электрических машинах, связанные с производством, могут привести к появлению дополнительных гармонических составляющих в кривых проводимости и/или м.д.с. магнитов, взаимодействие которых может привести к появлению добавочных моментов. Как показывает практика

производства электрических машин, самым распространенным и оказывающим наибольшее влияние на характеристики машины дефектом является эксцентриситет ротора. Поэтому вопрос влияния эксцентриситета ротора на гармонический состав и величину добавочных моментов требует отдельного рассмотрения.

Таким образом, задача уменьшения зубцовых пульсаций момента и добавочных моментов от эксцентриситета ротора в машинах с возбуждением от постоянных магнитов и дробными зубцовыми обмотками, а также комплекс задач, связанных с исследованием этих паразитных эффектов являются актуальными, имеют научную новизну и практическую ценность. В соответствии с указанными проблемами сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Целью диссертационной работы является** уменьшение зубцовых пульсаций момента и добавочных моментов от эксцентриситета ротора в синхронных машинах с возбуждением от постоянных магнитов и дробными зубцовыми обмотками.

Для достижения цели были **поставлены следующие задачи:**

1. разработка математической модели, описывающей механизм возникновения зубцовых пульсаций момента и добавочных моментов, обусловленных эксцентриситетом ротора в синхронных машинах с дробными зубцовыми обмотками и возбуждением от постоянных магнитов при отсутствии тока в обмотке статора.

2. исследование влияния геометрии воздушного зазора на величину зубцовых пульсаций момента и добавочных моментов от эксцентриситета ротора (ширины открытия паза статора, величины воздушного зазора, ширины магнитов в машинах с ротором радиального типа).

3. проведение сравнения результатов аналитических исследований с результатами, полученными с помощью численных методов моделирования магнитного поля с учетом эффектов насыщения и краевых эффектов, а также с результатами натурных экспериментов на реальных электрических машинах.

### **Методы исследования**

Результаты диссертационной работы получены с использованием методов теории электрических машин, метода гармонического анализа и численного расчета магнитного поля методом конечных элементов. Применены численные методы расчета интегральных уравнений. Достоверность результатов подтверждается сопоставлением расчетных и экспериментально полученных зависимостей.

### **Научная новизна**

1. Разработана аналитическая модель, описывающая принцип возникновения зубцовых пульсаций момента и добавочных моментов от статического эксцентриситета ротора в синхронных машинах с возбуждением от постоянных

магнитов и дробными зубцовыми обмотками при отсутствии тока в обмотке статора.

2. Аналитически описаны зависимости амплитуд гармоник зубцовых пульсаций момента от ширины открытия паза статора для машин с различным числом пазов на полюс и фазу и радиальным расположением магнитов на роторе.

3. С помощью численного моделирования получены зависимости амплитуд гармоник добавочных моментов от величины статического эксцентриситета ротора, а также зависимость гармоник зубцовых пульсаций момента от ширины открытия паза и коэффициента полюсного перекрытия.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Аналитическая модель, описывающая механизм возникновения зубцовых пульсаций момента и добавочных моментов от эксцентриситета ротора в машинах с возбуждением от постоянных магнитов с дробными зубцовыми обмотками при отсутствии тока в обмотке статора.

2. Выражения для расчета порядковых номеров гармоник магнитной проводимости воздушного зазора и магнитодвижущей силы постоянных магнитов, участвующих в создании зубцовых пульсаций момента.

3. Выражение, описывающее зависимость амплитуд гармоник зубцовых пульсаций момента от ширины открытия паза статора.

#### **Практическая ценность работы**

1. Предложена аналитическая модель, описывающая механизм возникновения зубцовых пульсаций момента и добавочных моментов от эксцентриситета ротора в машинах с возбуждением от постоянных магнитов, справедливая для машин с радиальным расположением магнитов на роторе.

2. Предложены выражения для расчета порядковых номеров гармоник магнитной проводимости воздушного зазора и магнитодвижущей силы постоянных магнитов, участвующих в создании зубцовых пульсаций момента.

3. Даны рекомендации по определению оптимальных с точки зрения минимума зубцовых пульсаций момента ширины открытия паза статора и коэффициента полюсного перекрытия для машин с различным числом пазов на полюс и фазу и радиальным расположением магнитов.

4. Получены полиномиальные выражения зависимости гармоник добавочного момента от величины эксцентриситета ротора.

#### **Реализация**

Результаты работы использовались в процессе проектирования электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов с дробными зубцовыми обмотками на кафедре электромеханики НГТУ при выполнении хозяйственных работ, в том числе по договорам ЭМ-4-13 с ОАО «Калужский электромеханический завод» и ЭМ-4-11 с ОАО «АвтоВАЗ».

### **Апробация работы**

Основные результаты 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;

52-я Международная научная конференция МНСК-2014. Новосибирск. 2014;

20-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва. 2014;

15-я международная конференция «Электромеханика. Электротехнологии. Электротехнические материалы и компоненты». Алушта. 2014.

7-я международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика». Новосибирск. 2015.

### **Публикации**

По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 статьи входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ, 5 статей в материалах международных и всероссийских конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 76 наименований, 2 приложений, содержит 137 страниц основного текста, 73 рисунка, 15 таблиц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено обоснование актуальности диссертационной работы, изложены цели и задачи, методы решения поставленных задач. Показаны научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы выносимые на защиту положения и практическая ценность.

**В первой главе** приведен обзор альтернативных исследований зубцовых пульсаций момента и добавочных моментов от технологических погрешностей. Описаны основные свойства постоянных магнитов на основе различных материалов, показаны преимущества магнитов на базе редкоземельных материалов  $NdFeB$  (неодим-железо-бор) и  $SmCo$  (самарий-кобальт). В главе приводится описание различных конструкций роторов и статоров машин с возбуждением от постоянных магнитов, приведены примеры схем дробных зубцовых обмоток. Представлен обзор существующих методов уменьшения и расчета зубцовых пульсаций момента.

**Во второй главе** приводится аналитическое исследование зубцовых пульсаций момента в машинах с дробными зубцовыми обмотками и возбуждением от постоянных магнитов при отсутствии токов в обмотке статора. При этом рассматриваются машины с радиальным расположением магнитов. Магнитная проводимость в воздушном зазоре и м.д.с. магнитов представлены при этом

бесконечными рядами Фурье, а эквивалентная поверхностная плотность тока выражена через м.д.с. магнитов:

$$j(\alpha, \theta) = -\frac{dF(\alpha, \theta)}{R_\delta d\alpha}.$$

На основании закона Ампера получена зависимость момента от угла поворота ротора  $\theta$  в обесточенной машине с активной длиной  $l_\delta$ , числом пар полюсов  $p$ , числом зубцов  $z_1$ , со средним радиусом воздушного зазора  $R_\delta$ :

$$M(\theta) = \frac{\pi l_\delta R_\delta p}{2} \left[ \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} k F_{mk}^2 \Lambda_{mv} \sin v z_1 \theta + 2 \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\substack{k=1 \\ i \neq k}}^{\infty} k F_{mk} F_{mi} \Lambda_{mv} \sin v z_1 \theta \right], \quad (1)$$

где  $\Lambda_{mv}$  –  $v$ -ая гармоника магнитной проводимости воздушного зазора,  $F_{mk}$  и  $F_{mi}$  –  $k$ -ая и  $i$ -ая гармоники м.д.с. магнитов. Причем первое и второе слагаемые в скобках не равны нулю только при выполнении следующих условий соответственно:

$$\frac{k}{v} = \frac{z_1}{2p}, \quad \frac{(k \pm i)}{v} = \frac{z_1}{p}. \quad (2)$$

На основании условий (2) получены выражения для расчета порядковых номеров гармоник м.д.с. магнитов и магнитной проводимости воздушного зазора, участвующих в создании момента (таблица 1). Из выражения для момента (1) с учетом выражений в таблице 1 следует, что порядковый номер гармоник зубцовых пульсаций момента в машинах с четными числами зубцов статора и пар полюсов ротора, отношение  $\frac{z_1}{2}$  которых является четным, равен:

$$n_{ct} = j \cdot \frac{p \cdot z_1}{2}, \quad j = 1, 2, 3, \dots,$$

в машинах со всеми другими сочетаниями:

$$n_{ct} = j \cdot p \cdot z_1, \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

Под первой гармоникой при этом понимается пространственная гармоника, период которой соответствует  $360^\circ$  геометрических градусов. Таким образом, порядковый номер гармоник зубцовых моментов определяется произведением числа пар полюсов и числа зубцов машины.

Также во второй главе приводятся результаты исследования зубцовых пульсаций момента, проведенного с помощью двухмерного численного моделирования в программном продукте FEMM 4.2. При этом исследовались модели с различными конструкциями ротора (рисунок 1): с ротором радиального типа (а), с ротором тангенциального типа без мостиков насыщения (б) и с ротором тангенциального типа с мостиками насыщения (в). Кроме того, каждая из

перечисленных конструкций исследовалась с различным числом пазов на полюс и фазу статора:  $q=1/2$  ( $z_1=6, p=2$ ),  $q=2/5$  ( $z_1=12, p=5$ ),  $q=3/8$  ( $z_1=18, p=8$ ).

Таблица 1 - Расчет взаимодействующих гармоник м.д.с. магнитов и проводимости воздушного зазора

|                 | $z_1$ - четное                    |                           | $z_1$ - нечетное        |                  |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
|                 | м.д.с.                            | Проводимость              | м.д.с.                  | Проводимость     |
| p -<br>четное   | основные                          |                           | основные                |                  |
|                 | $k = j \cdot \frac{z_1}{2}$       | $v = j \cdot p$           | $k = j \cdot z_1$       | $v = 2j \cdot p$ |
|                 | комбинационные                    |                           | комбинационные          |                  |
|                 | $k \pm i = j \cdot \frac{z_1}{2}$ | $v = j \cdot \frac{p}{2}$ | $k \pm i = j \cdot z_1$ | $v = j \cdot p$  |
| p -<br>нечетное | основные                          |                           | основные                |                  |
|                 | $k = j \cdot \frac{z_1}{2}$       | $v = j \cdot p$           | $k = j \cdot z_1$       | $v = 2j \cdot p$ |
|                 | комбинационные                    |                           | комбинационные          |                  |
|                 | $k \pm i = j \cdot z_1$           | $v = j \cdot p$           | $k \pm i = j \cdot z_1$ | $v = j \cdot p$  |

После расчета магнитного поля при различных положениях ротора производился расчет момента, действующего на ротор, методом тензора напряжений Максвелла. Зависимости момента от угла поворота ротора, для моделей с числом пазов на полюс и фазу  $q=2/5$  представлены на рисунке 2 (1 – с радиальным ротором, 2 – с тангенциальным ротором без мостиков, 3 – с тангенциальным ротором с мостиками насыщения). Полученные зависимости были разложены в ряд Фурье (рисунок 3). При этом основная (первая)

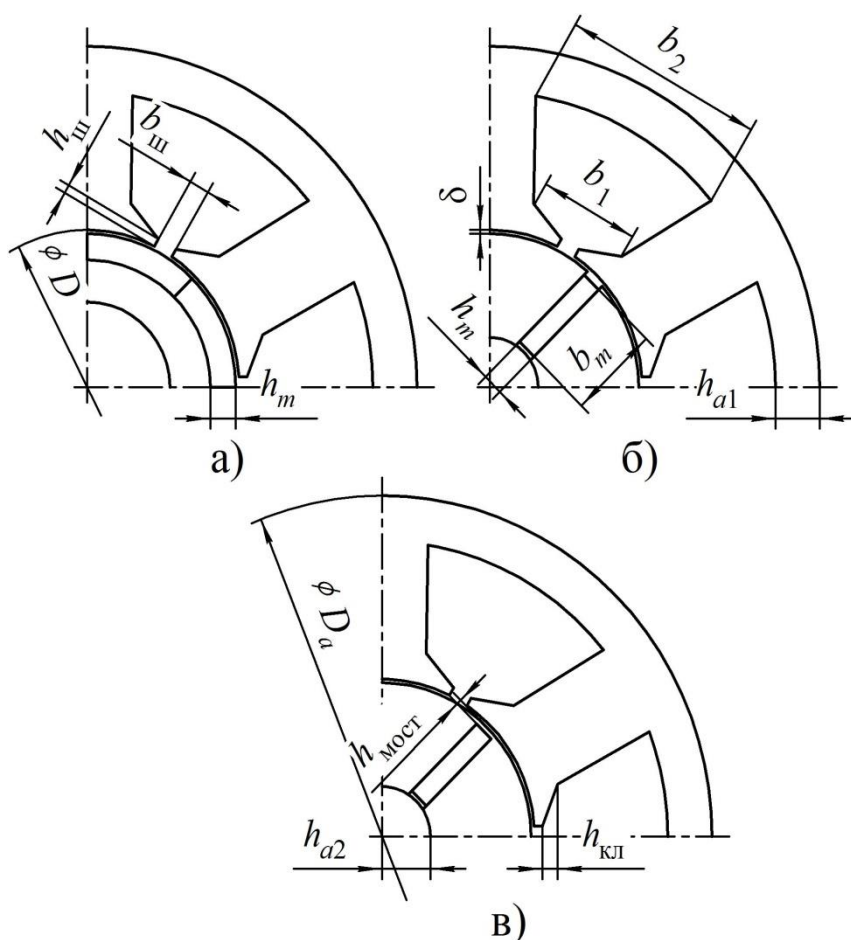


Рисунок 1 – Конструкции исследуемых моделей



гармоника зубцовых пульсаций момента является 60-ой гармоникой по отношению к первой пространственной гармонике с периодом  $360^\circ$ :

$$n_{ctj} = j \cdot p \cdot z_1 = 60j.$$

Аналогичные выводы были сделаны по результатам исследования моделей с  $q=1/2$  и  $q=3/8$ . Порядковые номера зубцовых пульсаций момента, полученные с помощью моделирования, также подтверждают результаты аналитических исследований:

$$n_{ctj} = j \cdot p \cdot z_1 = 12j - \text{для машин с } q=1/2;$$

$$n_{ctj} = j \cdot p \cdot z_1 = 144j - \text{для машин с } q=3/8.$$

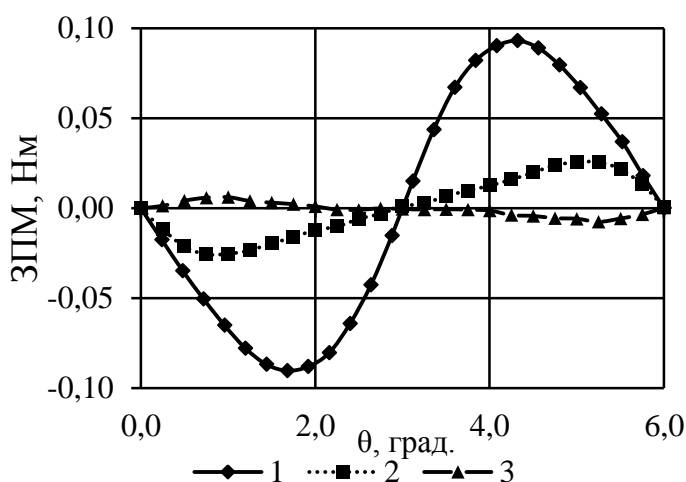


Рисунок 2 - Гармонический состав зубцовых пульсаций момента машин с  $q=2/5$

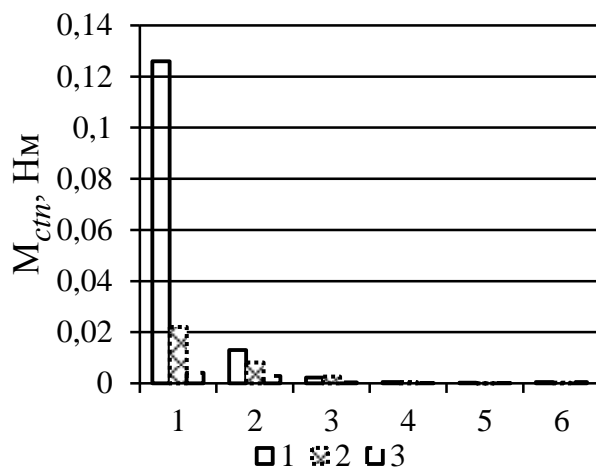


Рисунок 3 - Гармонический состав зубцовых пульсаций момента машин с  $q=2/5$

**Третья глава** посвящена исследованию влияния ширины открытия паза и коэффициента полюсного перекрытия на величину зубцовых пульсаций момента. В машинах с дробными зубцовыми обмотками краевые эффекты в области открытия паза оказывают сильное влияние на распределение магнитного поля в воздушном зазоре даже при обесточенной обмотке статора. Для учета этого эффекта и насыщения стали был проведен численный расчет поля в двухмерной модели (рисунок 4).

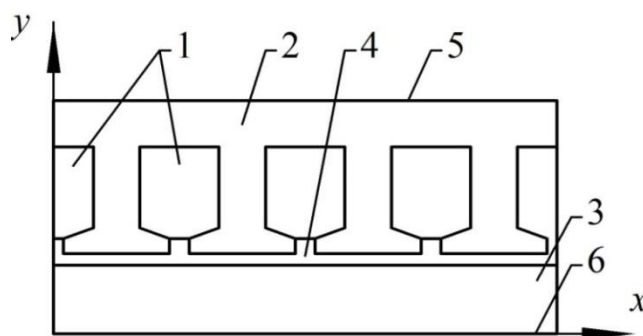


Рисунок 4 – Двухмерная модель для расчета распределения индукции в воздушном зазоре

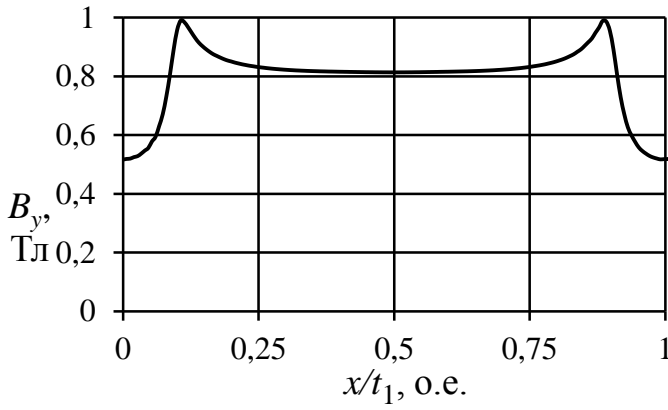


Рисунок 5 – Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре

Модель представляет собой участок развернутого статора 2 с пазами 1, развернутого магнита 3 и разделяющего их воздушного зазора 4. Результат расчета в виде зависимости индукции в воздушном зазоре от относительной координаты  $B_{\delta}\left(\frac{x}{t_1}\right)$  представлен на рисунке 5.

В результате анализа зависимости предложена функция, математически описываемая следующим образом:

$$\Lambda(x) = \begin{cases} \Lambda_{min} + \frac{\delta(\Lambda_{max} - \Lambda_{min})}{\sqrt{\delta^2 + (0.5b_{III} - x)^2}}, & x \in \left[0; \frac{b_{III}}{2}\right], \\ \Lambda_{\delta} + \frac{\delta(\Lambda_{max} - \Lambda_{\delta})}{\sqrt{\delta^2 + (x - 0.5b_{III})^2}}, & x \in \left[\frac{b_{III}}{2}; \frac{t_1}{2}\right], \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Lambda_{max}$  - максимальное значение проводимости зазора под границей коронки зубца и открытия паза,  $\Lambda_{\delta}$  - постоянное значение, к которому стремится функция при  $x = 0.5t_1$ ,  $\Lambda_{min}$  - постоянное значение, к которому стремится функция при  $x = 0$ . Коэффициенты ряда Фурье данной функции при этом:

$$\Lambda_{mv}(b_{III}) = \frac{4}{t_1} \left[ \int_0^{0.5b_{III}} \left( \Lambda_{min} + \frac{\delta(\Lambda_{max} - \Lambda_{min})}{\sqrt{\delta^2 + (0.5b_{III} - x)^2}} \cos\left(\frac{2\pi vx}{t_1}\right) \right) dx + \int_{0.5b_{III}}^{0.5t_1} \left( \Lambda_{\delta} + \frac{\delta(\Lambda_{max} - \Lambda_{\delta})}{\sqrt{\delta^2 + (x - 0.5b_{III})^2}} \cos\left(\frac{2\pi vx}{t_1}\right) \right) dx \right]. \quad (4)$$

На рисунке 6 представлены зависимости амплитуды 8-ой гармоники проводимости машины с числом пазов на полюс и фазу  $q=3/8$  от относительного открытия паза, рассчитанные по выражениям (1) и (4). В выражения (3) и (4) входят коэффициенты  $\Lambda_{max}$ ,  $\Lambda_{min}$  и  $\Lambda_{\delta}$ , значения которых зависят от величины остаточной индукции магнитов, формы коронок зубцов, самой ширины открытия паза, величины воздушного зазора, материала магнитопровода статора и пр. Поэтому, для получения более точного результата расчета зависимости зубцовых пульсаций момента от ширины открытия паза целесообразно воспользоваться численными методами расчета магнитного поля.

Численный расчет момента проводился на двухмерной модели, соответствующей машине, имеющей 18 зубцов и 8 пар полюсов ( $q=3/8$ ). Результат численного расчета представлен на рисунке 7 как зависимость амплитуды основной гармоники зубцовых пульсаций момента от относительной ширины открытия паза. На этом же рисунке изображена зависимость, соответствующая исследуемой модели, рассчитанная с помощью выражений (1) и (4). При этом значения пульсаций зависимости, рассчитанной с помощью численного моделирования, откладывались по оси ординат, находящейся слева от области графика, а значения пульсаций зависимости, рассчитанной по выражениям (1) и (4) – на оси ординат справа.

Периодичность зависимостей на рисунке 7 определяется периодом гармоники проводимости воздушного зазора, участвующей в создании зубцовых пульсаций момента. Для исследуемой машины он равен:

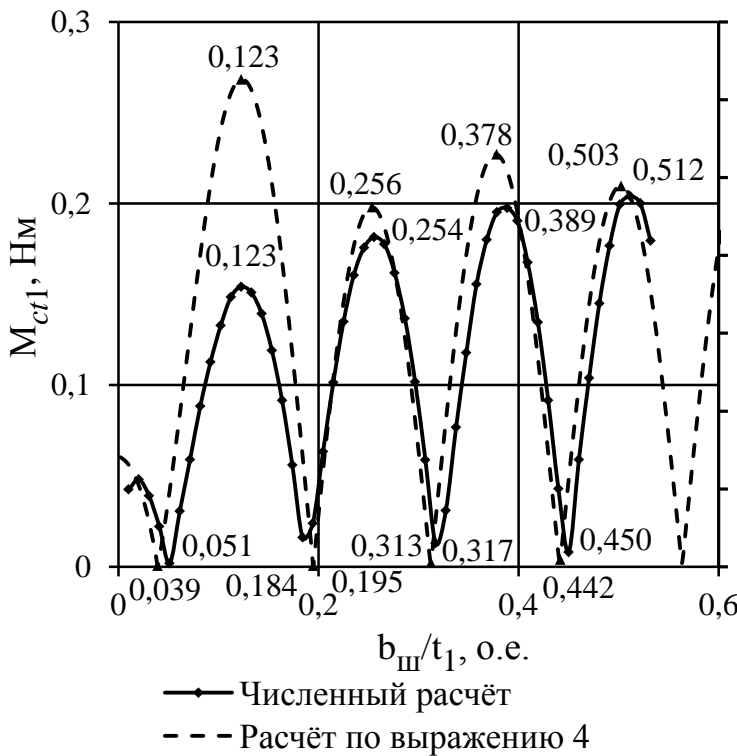


Рисунок 7 – Зависимость амплитуды основной гармоники ЗПМ от относительного открытия паза

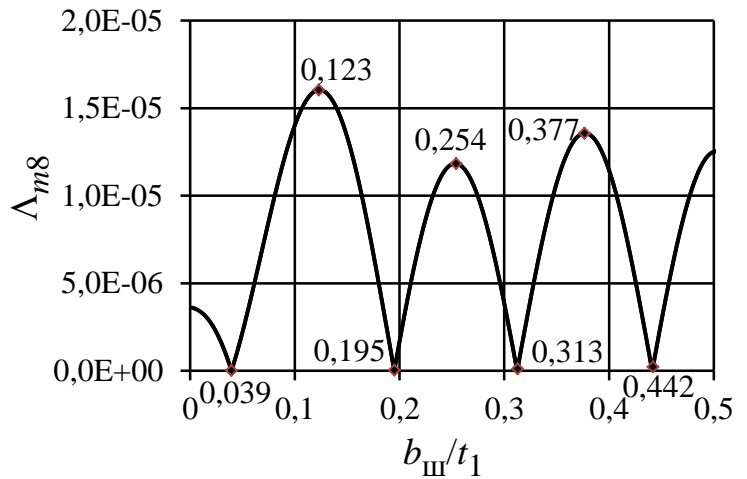


Рисунок 6 - Зависимость амплитуды 8-ой гармоники проводимости от относительного открытия паза

$$T'_{\Lambda 8} = \frac{T_{\Lambda 8}}{t_1} = \frac{t_1}{v \cdot t_1} = 0,125 \text{ о.е.}$$

Если при выборе оптимальной с точки зрения минимума основной гармоники зубцовых пульсаций момента ширины открытия паза основываться на выражениях (1) и (4), то, как показывает сравнение с результатами численного моделирования, амплитуду этих пульсаций можно уменьшить как минимум в 5 раз по отношению к максимальному ее значению.

Аналогичные исследования проведены с

машинами с  $q=1/2$  и  $q=2/5$ . После сравнительного анализа результатов этих исследований с численным моделированием сделан вывод, что на основе предложенного метода расчета зависимости основной гармоники зубцовых пульсаций момента можно добиться ее уменьшения в 2-8 раза.

Исследование влияния коэффициента полюсного перекрытия на величину зубцовых пульсаций момента проводилось с помощью численного моделирования. Рассчитывались модели машин с числом пазов на полюс и фазу  $q=1/2$  ( $z_1=6, p=2$ ),  $q=2/5$  ( $z_1=12, p=5$ ),  $q=3/8$  ( $z_1=18, p=8$ ). Исследования показали, что выбором оптимальной величины коэффициента полюсного перекрытия можно добиться существенного уменьшения зубцовых пульсаций момента. Однако для машин с небольшим числом полюсов  $z_1=6, p=2$  ( $q=1/2$ ), минимум зубцовых пульсаций момента соответствует коэффициенту полюсного перекрытия  $\alpha_p = 0,72$  (рисунок 8). Уменьшение ширины магнитов почти на 30% при прочих равных условиях может привести к сильному падению развиваемого электромагнитного момента. Поэтому для таких машин оптимизация ширины магнитов должна осуществляться не только с точки зрения минимума зубцовых пульсаций момента, но и с точки зрения максимума развиваемого электромагнитного момента.

В машинах с  $q=2/5$  и  $q=3/8$  зубцовые пульсации момента имеют минимумы, в том числе и при значениях коэффициента полюсного перекрытия, близкого к единице:  $\alpha_p = 0,96$  для машины с  $q=2/5$ , и  $\alpha_p = 0,93$  для машины с  $q=3/8$ . Таким образом, ширина магнитов для машин с такой дробностью может быть оптимизирована с точки зрения минимума зубцовых пульсаций момента практически без существенного уменьшения электромагнитного момента.

В четвертой главе проводилось исследование влияния статического эксцентриситета ротора на добавочные моменты. Аналитическая часть исследований проводилась с учетом допущений, что статор и ротор имеют гладкие поверхности, а кривая м.д.с. магнитов не имеет высших

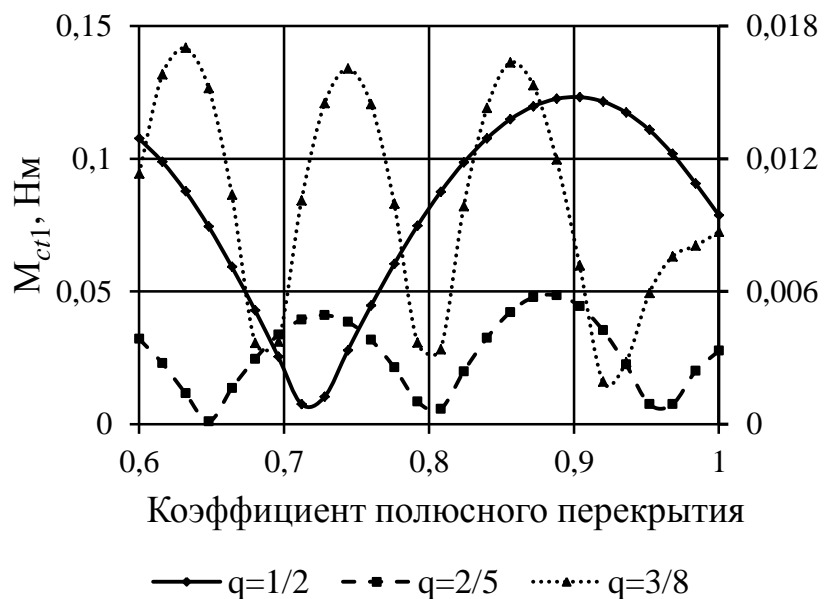


Рисунок 8 – Зависимость амплитуды основной гармоники ЗПМ от коэффициента полюсного перекрытия

гармоник. В итоге было получено выражение, описывающее зависимость момента от угла поворота ротора

$$M(\theta) = \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^{2p} \frac{2\pi\mu_0}{\delta} l_{\delta} R_{\delta} p F_m^2 \sin 2p\theta.$$

Очевидно, что при наличии статического эксцентриситета ротора в машине с постоянными магнитами появляются добавочные моменты, число периодов которых на один оборот ротора кратно числу полюсов. Данное выражение получено при достаточно грубых допущениях и лишь качественно описывает зависимость момента от угла поворота ротора и величины относительного эксцентриситета.

Для более точного расчета было использовано численное моделирование. На рисунке 9 представлены зависимости момента от угла поворота ротора машины без эксцентриситета и с относительным эксцентриситетом  $\varepsilon=0,8$  с числом пазов на полюс и фазу  $q=1/2$ . Результат разложения этих кривых приведен на рисунке 10.

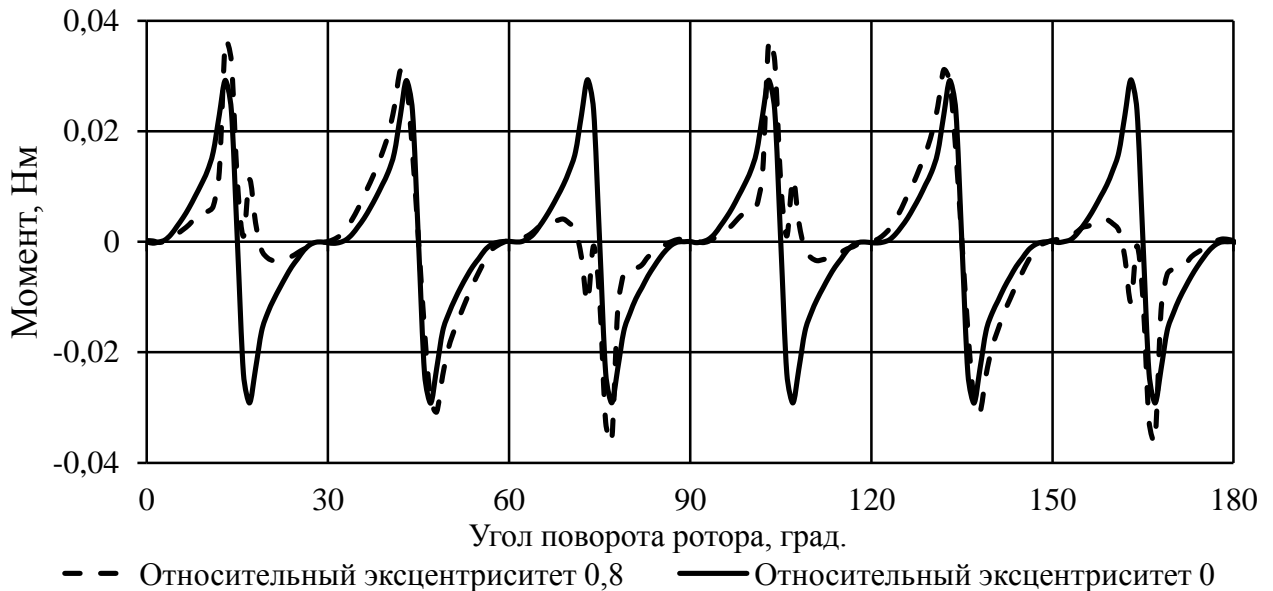


Рисунок 9 - Зависимость момента от угла поворота ротора при статическом эксцентриситете в машине с  $q=1/2$

Гармонический анализ показывает, что в машине без эксцентриситета присутствуют только гармоники зубцовых пульсаций момента. При наличии эксцентриситета в кривой момента появляются гармоники добавочного момента с порядковыми номерами, кратными  $2p$ :  $n_{ат} = 2j \cdot p = 4, 8, 12, \dots$

Так же с помощью численного моделирования оценено влияние величины эксцентриситета на амплитуду гармоник добавочного момента. На рисунке 11 маркерами обозначены относительные амплитуды некоторых гармоник добавочного момента, рассчитанные при различных значениях относительного эксцентриситета  $\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{\delta} = (0 \div 0,8)$ . За базовое значение момента принято значение амплитуды 12-ой гармоники момента, обусловленной зубцовыми пульсациями при

отсутствии эксцентриситета.

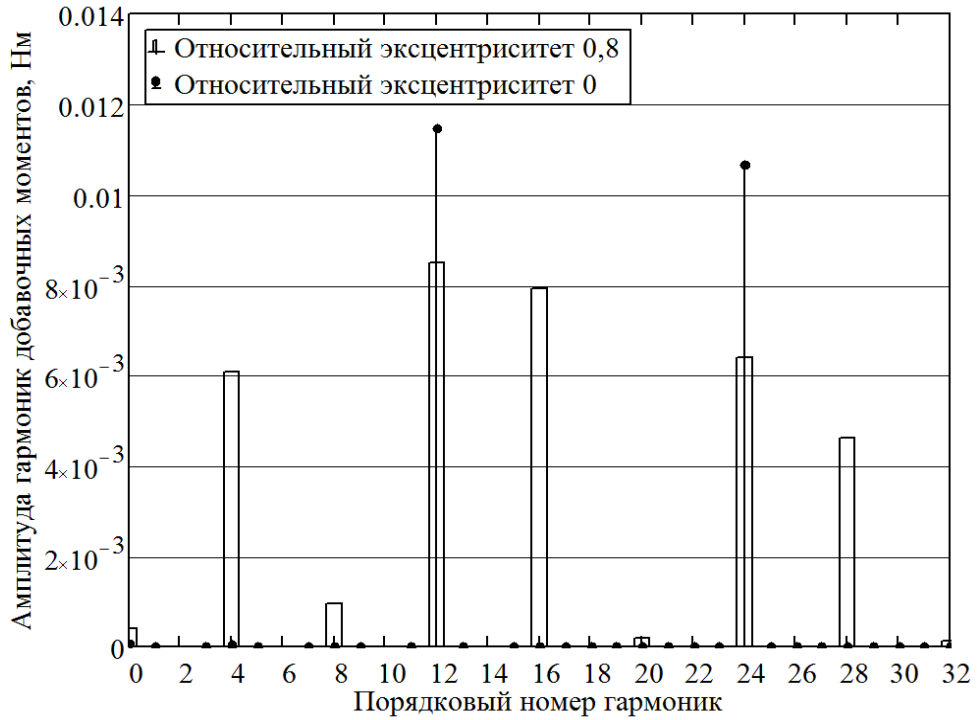


Рисунок 10 – Спектральный состав момента машины с  $q=1/2$  при наличии статического эксцентриситета

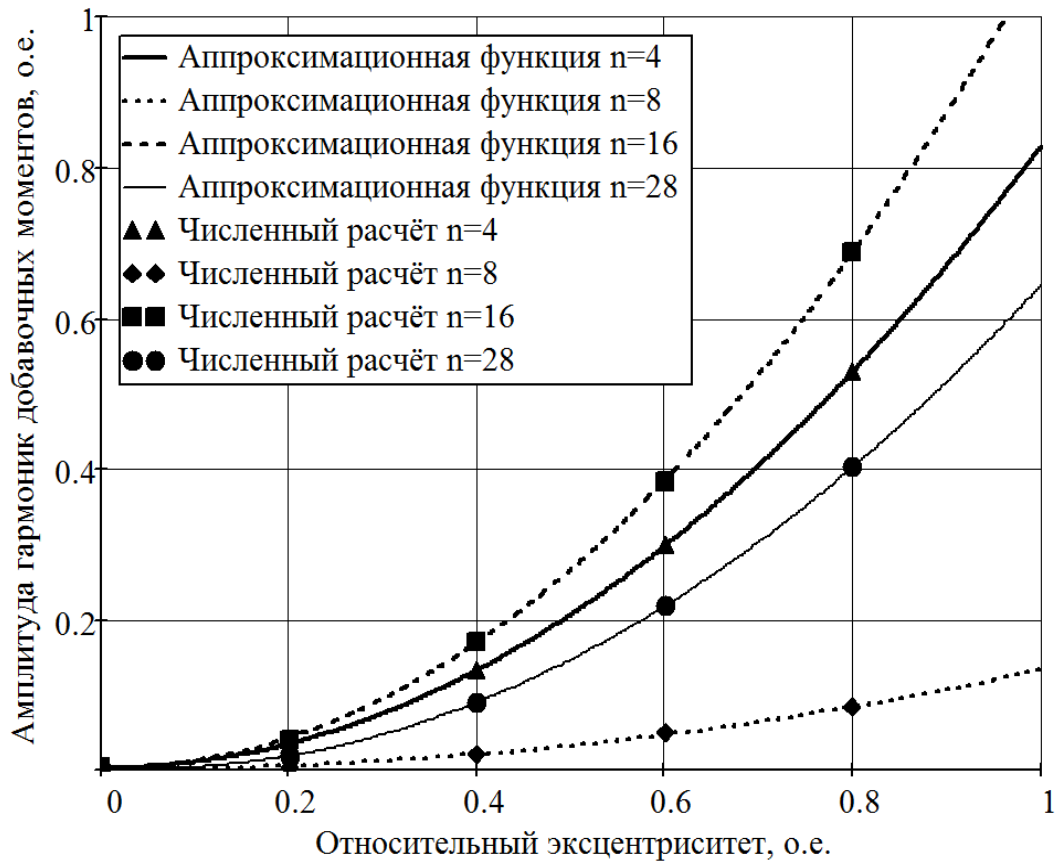


Рисунок 11 – Зависимость амплитуд гармоник добавочного момента от относительного эксцентриситета машины с  $q=1/2$

Данные зависимости были аппроксимированы методом наименьших квадратов. Таким образом, например для 16-ой гармоники, зависимость момента может быть описана выражением:

$$\hat{M}_{at16}(\varepsilon') = 1,102(\varepsilon')^2 - 0,026\varepsilon' + 0,003,$$

достоверность аппроксимации  $R^2$  при этом не менее 0,99.

Аналогичные расчеты проведены для машин с  $q=2/5$ . Разложение зависимости момента от угла поворота в ряд Фурье показало, что кривая имеет в своем спектральном составе гармоники с порядковыми номерами кратными  $2p$ :

$$n_{at} = 2j \cdot p = 10, 20, 30 \dots$$

Полученные зависимости также аппроксимированы квадратичными зависимостями.

**Пятая глава** посвящена экспериментальным исследованиям зубцовых пульсаций момента и добавочных моментов от эксцентриситета. Объектами исследований при этом являлись опытные образцы электрических машин для привода электромеханического усилителя руля (рисунок 12). Условно, эти машины обозначены как ЭМУР-1 ( $z_1=18, p=8, q=3/8$ ), ЭМУР-2 и ЭМУР-3 ( $z_1=12, p=5, q=2/5$ ). Полюса ротора ЭМУР-2 имеют форму лепестков, а коронки зубцов ЭМУР-3 имеют спрямленную форму.

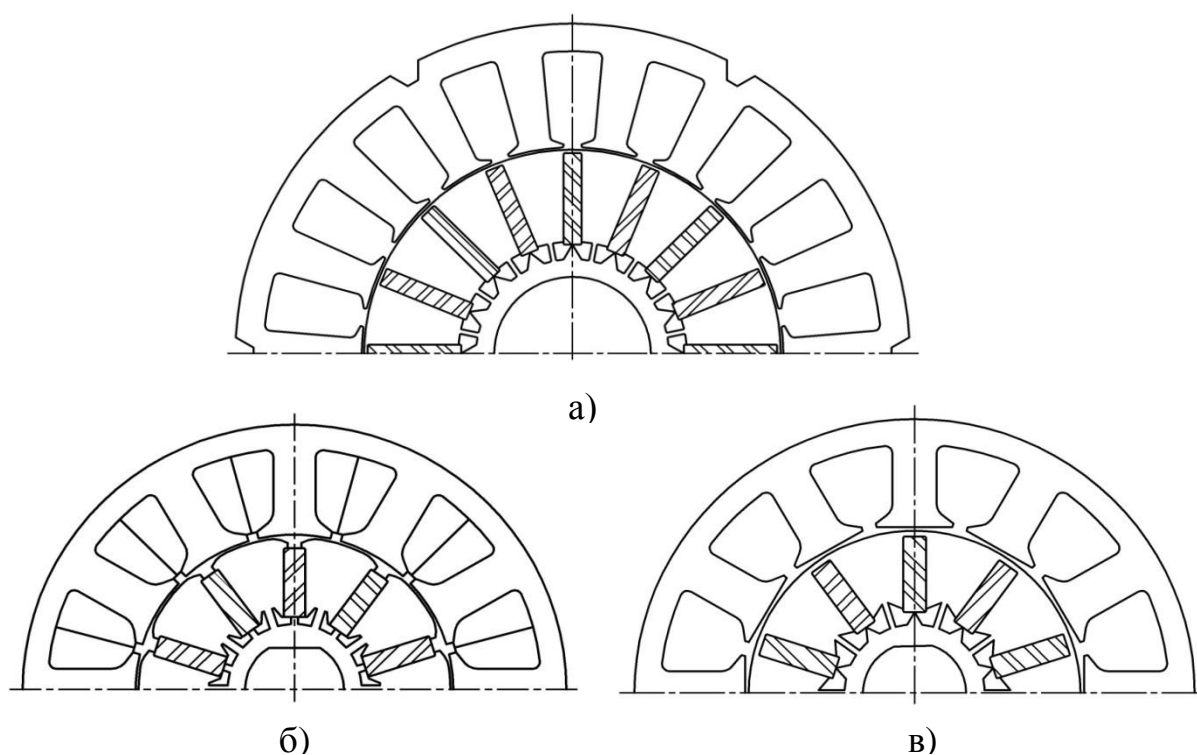


Рисунок 12 – Геометрия активной части исследуемых машин

а) ЭМУР-1; б) ЭМУР-2; в) ЭМУР-3

Угловое положение ротора относительно статора задавалось с помощью оптической головки, позволяющей фиксировать это положение с точностью до одной секунды. Вал исследуемой машины соединялся с валом делительной головки через компенсационные муфты и датчик момента компании Magtrol. Показания датчика момента записывались на полном обороте ротора с шагом в  $1^\circ$ .

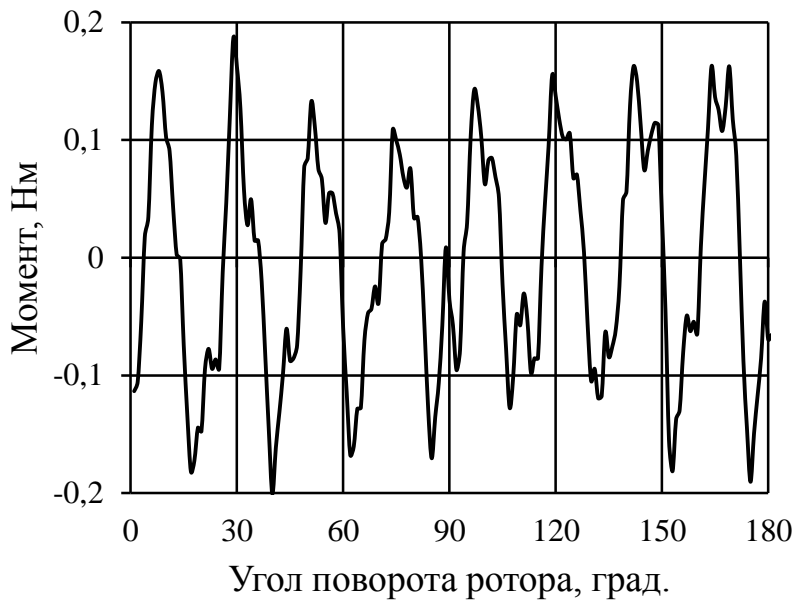


Рисунок 13 – Зависимость момента от угла поворота ротора ЭМУР-1

Исследования проводились при обесточенной обмотке статора.

На рисунке 13 представлены результаты эксперимента с ЭМУР-1. Полученная зависимость была разложена в ряд Фурье, и ее спектр показан на рисунке 14. Гармоника с порядковым номером 144 является основной гармоникой зубцовых пульсаций момента и определяется произведением числа зубцов на число пар

полюсов. Все остальные представленные гармоники кратны либо 16-ти, либо 18-ти. Первые обусловлены наличием в машине статического эксцентриситета, а вторые – наличием динамического эксцентриситета и/или эллипсностью ротора.

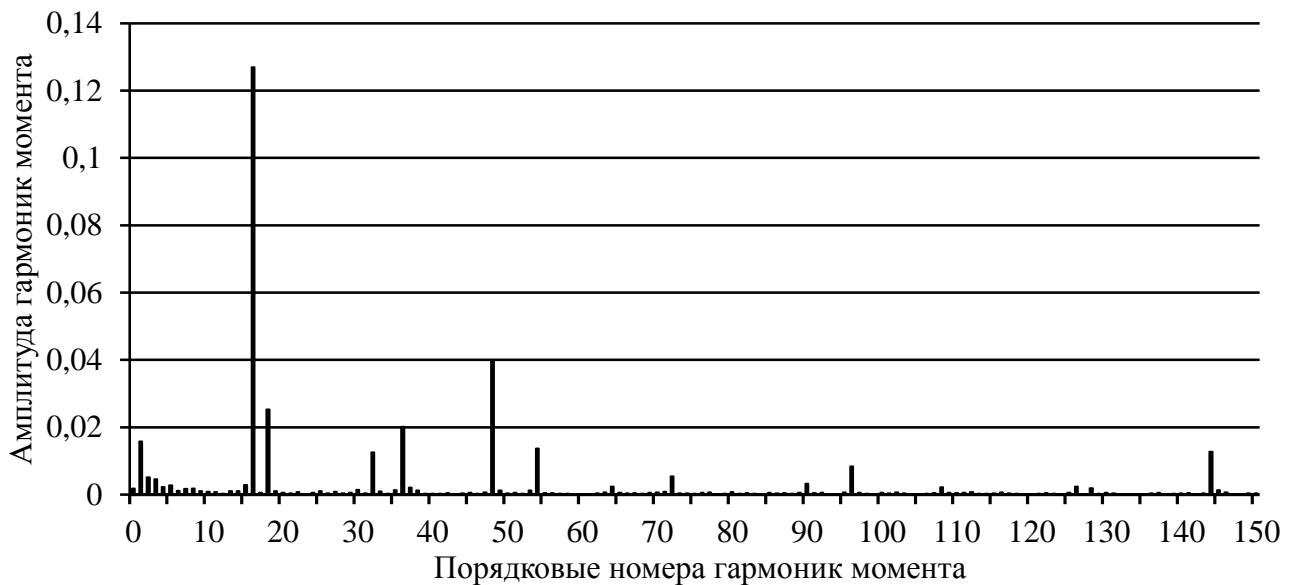


Рисунок 14 – Гармонический состав ЭМУР-1

Подобные исследования проведены и на машинах ЭМУР-2 и ЭМУР-3. Также получены зависимости момента от угла поворота ротора и гармонический состав этих зависимостей (рисунок 15). В обоих случаях момент имеет ярко выраженные 10-ую и 12-ую гармоники, что говорит о наличии в машине статического и динамического эксцентриситета соответственно. Основная гармоника зубцовых пульсаций момента имеет 60-ый порядковый номер. Гармонический состав момента ЭМУР-3 изображен на рисунке 16.



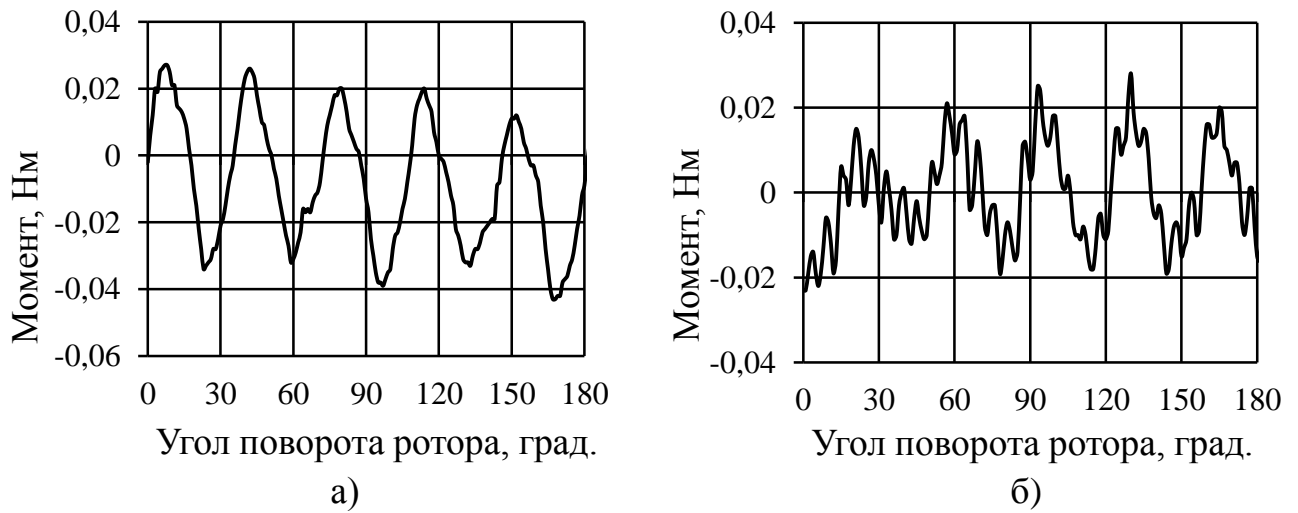


Рисунок 15 – Зависимости момента от угла поворота ротора

а) ЭМУР-2; б) ЭМУР-3

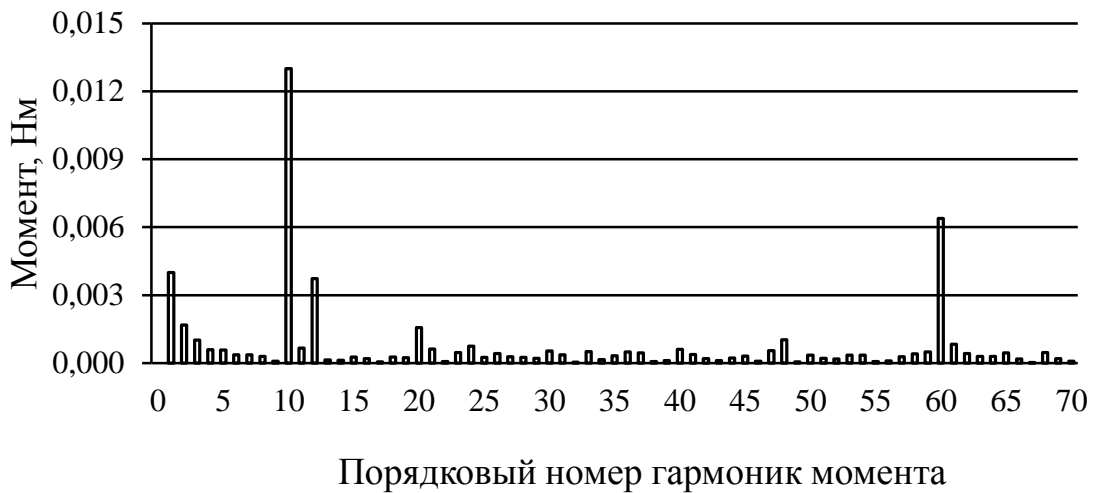


Рисунок 16 – Гармонический состав момента ЭМУР-3

**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана математическая модель, описывающая механизм возникновения зубцовых пульсаций момента в синхронных машинах с дробными зубцовыми обмотками и возбуждением от постоянных магнитов при отсутствии тока в обмотке статора. Показано, что зубцовые пульсации момента являются результатом взаимодействия определенных гармоник магнитной проводимости воздушного зазора и м.д.с. магнитов. Число этих пульсаций на один оборот ротора определяется произведением числа зубцов и числа пар полюсов  $z_1 \cdot p$  машины. Порядковый номер гармоник зубцовых пульсаций момента в машинах с четными числами зубцов статора и пар полюсов ротора, отношение  $\frac{z_1}{2}$  которых является четным, равен:

$$n_{ct} = j \cdot \frac{p \cdot z_1}{2}, j = 1, 2, 3, \dots,$$

в машинах со всеми другими сочетаниями:

$$n_{ct} = j \cdot p \cdot z_1, j = 1, 2, 3 \dots$$

2. Получены выражения для расчета порядковых номеров гармоник магнитной проводимости воздушного зазора и м.д.с. магнитов, обуславливающих возникновение зубцовых пульсаций момента.

3. Предложено математическое описание проводимости воздушного зазора в машинах с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками, учитывающее насыщение стали и краевые эффекты в области коронок зубцов статора. На основании этого выражения получены зависимости основных гармоник зубцовых пульсаций момента от ширины открытия паза для машин с  $q=1/2, 2/5$  и  $3/8$ . Сравнение этих зависимостей с результатами численного расчета показало, что на основе предложенного выражения амплитуда основной гармоники зубцовых пульсаций момента может быть уменьшена за счет оптимизации ширины открытия паза в 2-8 раз.

4. Численными методами исследовано влияние коэффициента полюсного перекрытия на величину зубцовых пульсаций момента. Выбором оптимальной величины этого параметра можно добиться существенного уменьшения зубцовых пульсаций момента. В машинах с  $z_1=12, p=5$  ( $q=2/5$ ) и  $z_1=18, p=8$  ( $q=3/8$ ) амплитуда основной гармоники зубцовых пульсаций момента приближаются к нулю при значениях коэффициента полюсного перекрытия, близкого к единице:  $\alpha_p = 0,96$  для машины с  $q=2/5$ , и  $\alpha_p = 0,93$  для машины с  $q=3/8$ . Однако для машин с небольшим числом полюсов  $z_1=6, p=2$  ( $q=1/2$ ), минимум зубцовых пульсаций момента соответствует коэффициенту полюсного перекрытия  $\alpha_p = 0,72$ . Для таких машин оптимизация ширины магнитов должна осуществляться не только с точки зрения минимума зубцовых пульсаций момента, но и с точки зрения необходимого развиваемого электромагнитного момента.

5. Получено выражение, описывающее добавочные моменты, обусловленные эксцентриситетом ротора. Число пульсаций этих добавочных моментов на оборот ротора определяется полюсностью машины. Наличие статического эксцентриситета приводит к взаимодействию возникшей вследствие его гармоники проводимости с основной гармоникой м.д.с. магнитов. Поэтому единственным путем его уменьшения является повышение точности изготовления машины. Численное моделирование показало, что величина этих моментов квадратично зависит от величины эксцентриситета.

6. Результаты экспериментальных исследований показали, что момент во всех исследованных образцах в своем спектральном составе имеет гармоники с порядковыми номерами кратными  $z_1 \cdot p$  (зубцовые пульсации момента) и  $2p$  (добавочные моменты от статического эксцентриситета ротора). Кроме того, имеются гармоники кратные числу зубцов, которые могут быть вызваны наличием

динамического эксцентриситета, эллипсностью статора либо другими дефектами и требуют отдельного изучения.

7. Результаты диссертационной работы представляют практический интерес для ОАО «Калужский электромеханический завод» (г. Калуга) и ООО «Технологическая компания Шлюмберже» (г. Тюмень) и могут быть использованы в виде рекомендаций при выборе оптимальной геометрии воздушного зазора при изготовлении электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов и дробными зубцовыми обмотками.

**Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:**

Научные публикации по теме диссертации в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Топорков Д.М. Исследование пульсаций момента синхронных магнитоэлектрических машин с дробными зубцовыми обмотками / Д.М. Топорков, А.Ф. Шевченко, А.Г. Приступ // Электротехника. – 2014. - №12. – С. 36-40.
2. Топорков Д.М. Исследование способов уменьшения пульсаций момента в магнитоэлектрических синхронных машинах с дробными зубцовыми обмотками / Д.М. Топорков, А.Г. Приступ // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. - №6. – С. 14-17.
3. Топорков Д.М. Особенности конструкции и проектирования энергоэффективных магнитоэлектрических электродвигателей общепромышленного назначения / Д.М. Топорков, А.Г. Приступ, А.Ф. Шевченко, В.В. Корнеев, О.И. Новокрещенов // Электротехника. – 2014. - № 12. – С. 41-44.

Другие научные публикации по теме диссертации:

1. Топорков Д. М. Исследование зубцовых пульсаций момента в синхронных машинах с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками / Д. М. Топорков; науч. рук. А. Ф. Шевченко // Студент и научно-технический прогресс. Мехатроника и автоматизация: материалы 52 междунар. науч. студ. конф., Новосибирск, 11–18 апр. 2014 г. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. – С. 54.
2. Топорков Д. М. Аналитическое исследование пульсаций момента в синхронных машинах с постоянными магнитами / Д. М. Топорков // 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. 110-113.
3. Топорков Д. М. Расчет зубцовых пульсаций момента в синхронных машинах с постоянными магнитами / Д. М. Топорков; науч. рук. А. Ф. Шевченко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 20 междунар. науч.-техн.

конф. студентов и аспирантов, Москва, 27–28 февр. 2014 г.: тез. докл. – Москва: Издат. дом МЭИ, 2014. – Т. 2. – С. 156.

4. Топорков Д.М. 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. 75-77.
5. Топорков Д. М. Исследование дополнительных пульсаций момента в синхронных машинах с возбуждением от постоянных магнитов / Д. М. Топорков; науч. рук. А. Ф. Шевченко // Материалы 53 международной научной студенческой конференции (МНСК-2015). Мехатроника и автоматизация, 11–17 апр. 2015 г. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2015. – С. 93.

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 455. Подписано в печать 22.03.2016 г.