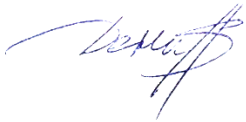
На правах рукописи



Бабицкий Денис Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОБАВОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ И РАДИАЛЬНЫХ СИЛ В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ С ДРОБНЫМИ ЗУБЦОВЫМИ ОБМОТКАМИ

Специальность: 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2026

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

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

Официальные оппоненты: **Сафин Альфред Робертович,**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», учебно-исследовательская лаборатория «Электроснабжение промышленных предприятий, надежности и диагностики в электроэнергетике» кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», главный научный сотрудник;

Казаков Юрий Борисович,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кафедра «Электромеханики», профессор.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», г. Москва.

Защита диссертации состоится «04» февраля 2027 года в $10^{\underline{00}}$ часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.07, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корпус I, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета, а также на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «____» ноября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.347.07
к.т.н., доцент Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Возможность применения синхронных электрических машин, в которых возбуждение обеспечивается за счет магнитного поля постоянных магнитов (ПМ), известна достаточно давно. Среди преимуществ данного класса машин стоит выделить: бесконтактность, простоту конструкции, отсутствие электрических потерь на возбуждение. В настоящее время данные машины нашли широкое применение в различных областях техники, включая силовые электроприводы, станкостроение, электротранспортные системы, ветроэнергетические установки, а также бытовые электроприборы.

В качестве отдельного подкласса следует выделить электрические машины с постоянными магнитами, выполненные на основе дробных зубцовых обмоток (ДЗО), имеющих число пазов на полюс и фазу $q<1$. Особенностью такого класса обмоток является ее конструктивное исполнение: каждая катушка охватывает только один зубец, что позволяет уменьшить аксиальную длину электрической машины, а также снизить электрические потери в сравнении классическими обмотками за счет коротких лобовых частей.

Негативным фактором ДЗО является образование ими широкого спектра нерабочих гармоник магнитодвижущей силы (МДС). Нерабочие гармоники не участвуют в преобразовании энергии, но вызывают ряд негативных эффектов, включая: формирование добавочных электромагнитных моментов; возбуждение вихревых токов в объеме постоянных магнитов; дополнительные магнитные потери в магнитопроводе; возникновение радиальных сил, приводящих к магнитным вибрациям и шуму; повышенный уровень дифференциального рассеяния.

Расширение общей теории электрических машин с ДЗО и исследование способов улучшения гармонического состава создаваемой ими МДС остаются актуальной научной задачей. Решение этой проблемы позволит не только повысить эффективность таких машин за счет минимизации их недостатков, но и расширит сферу применения, открывая новые возможности для использования в современных энергетических системах.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в теорию применения постоянных магнитов в электрических машинах внесли отечественные ученые А. Н. Ларионов, В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ледовский, Я. Б. Данилевич, Д. А. Бут. Однако на момент публикации работ этих исследователей электрические машины с постоянными магнитами не получили массового распространения.

Существенному развитию класса электрических машин, выполненных на основе ДЗО, способствовали работы А. Ф. Шевченко. Им разработаны методы построения и проанализированы особенности устройства симметричных многофазных ДЗО, показан принцип действия электромеханических преобразователей энергии с такими обмотками, рассмотрена возможность их применения. А. Ф. Шевченко установил, что ДЗО создают МДС, в пространственном гармоническом составе которой можно выделить две гармоники, обладающие высокой амплитудой, каждая из которых может быть выбрана в качестве рабочей. Кроме того, было показано, что такие обмотки создают широкий спектр пространственных нерабочих гармоник: имеют место как гармонические составляющие низких порядков, так и высшие гармонические составляющие.

Широкое внедрение электрических машин с ДЗО и ПМ привело к активной разработке различных способов снижения или устранения указанных гармоник с целью минимизации возникающих негативных эффектов. Однако текущие исследования в этой области ограничиваются анализом отдельных вариантов ДЗО и

не оценивают возможность применения разработанных подходов к другим типам обмоток. Таким образом, остается неясной эффективность применения описанных подходов для распространения на весь класс ДЗО.

Объектом исследования являются синхронные электрические машины с ДЗО и ПМ. **Предметом исследования** является пространственный гармонический состав МДС ДЗО и его влияние на нежелательные добавочные электромагнитные моменты и электромагнитные радиальные силы.

Целью работы является разработка научно обоснованных подходов к снижению нежелательных добавочных электромагнитных моментов и электромагнитных радиальных сил в синхронных электрических машинах с ДЗО и ПМ.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи:**

1. Установить аналитические зависимости, определяющие условия возникновения пульсаций электромагнитного момента в синхронных машинах с ДЗО и возбуждением от ПМ.
2. Установить аналитические соотношения и выявить условия возникновения радиальных сил магнитного происхождения в машинах с ДЗО и возбуждением от ПМ.
3. Провести сравнительное моделирование и многокритериальную оценку эффективности различных способов улучшения гармонического состава МДС ДЗО для определения наиболее рационального подхода.
4. Сформировать научно обоснованные рекомендации по распространению наиболее эффективного способа улучшения гармонического состава МДС для его использования в широком классе электрических машин с ДЗО и ПМ.

Научная новизна основных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Описан механизм возникновения пульсаций электромагнитного момента в машинах с ДЗО и ПМ, обусловленный электромагнитным взаимодействием МДС ДЗО, МДС поля ПМ и удельной эквивалентной магнитной проводимости воздушного зазора при односторонней зубчатости со стороны статора, что позволяет определить номера пространственных гармоник этих функций, участвующих в создании пульсаций.
2. Описан механизм возникновения низкочастотных составляющих радиальных электромагнитных сил, приводящих к магнитным вибрациям, в машинах с ДЗО и ПМ, обусловленный электромагнитным взаимодействием МДС ДЗО, МДС поля ПМ и удельной эквивалентной магнитной проводимости воздушного зазора при односторонней зубчатости со стороны статора, что позволяет определить номера пространственных гармоник этих функций, участвующих в создании таких сил.
3. На основе результатов сравнительного моделирования и комплекса критериев определено преимущество подхода, основанного на выполнении ДЗО в виде двух элементарных обмоток, уложенных в отдельных пазах, и обеспечивающего наибольшее подавление нежелательных пространственных гармоник МДС ДЗО, участвующих в создании исследуемых добавочных электромагнитных моментов и низкочастотных составляющих электромагнитных радиальных сил.
4. На основе проведенного гармонического анализа расширена область применения конструктивного подхода, при котором ДЗО выполнена в виде двух элементарных обмоток, уложенных в отдельных пазах. Показана эффективность данного подхода в подавлении нежелательных пространственных гармоник МДС

ДЗО, а также представлена принципиальная возможность его распространения на проектирование всего класса ДЗО.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Описанный механизм возникновения пульсаций электромагнитного момента в машинах с ДЗО и ПМ позволяет определить номера пространственных гармоник МДС ДЗО, МДС поля ПМ и удельной эквивалентной магнитной проводимости воздушного зазора при односторонней зубчатости со стороны статора, снижение которых способствует уменьшению пульсаций электромагнитного момента и повышению плавности вращения электрической машины. Для наиболее распространенных ДЗО приведены конкретные номера гармоник исследуемых функций, участвующих в образовании пульсаций электромагнитного момента.
2. Описанный механизм возникновения низкочастотных составляющих радиальных электромагнитных сил в машинах с ДЗО и ПМ позволяет определить номера пространственных гармоник МДС ДЗО, МДС поля ПМ и удельной эквивалентной магнитной проводимости воздушного зазора при односторонней зубчатости со стороны статора, снижение которых способствует уменьшению таких сил и снижению магнитных вибраций электрической машины. Для наиболее часто применяемых ДЗО определены конкретные номера гармоник исследуемых функций, участвующих в создании низкочастотных составляющих электромагнитных радиальных сил.
3. По результатам сравнительного моделирования и многокритериальной оценки эффективности различных способов улучшения гармонического состава МДС ДЗО показано преимущество подхода, основанного на выполнении ДЗО в виде двух элементарных обмоток, уложенных в отдельных пазах. Установлено, что данный подход позволяет подавлять пространственные гармоники МДС ДЗО, непосредственно участвующие в создании нежелательных добавочных электромагнитных моментов и низкочастотных составляющих электромагнитных радиальных сил.
4. Показана возможность распространения подхода выполнения ДЗО в виде двух элементарных обмоток, уложенных в отдельных пазах, на весь класс ДЗО. Сформулированы практические рекомендации для наиболее распространенных ДЗО по выбору величины пространственного сдвига между элементарными обмотками и их взаимного включения, обеспечивающие подавление нежелательных гармонических составляющих МДС.

Методы исследования. Результаты работы получены с использованием аналитических методов теории электрических машин и метода гармонического анализа. Для исследования распределения магнитного поля был применен метод конечно-элементного анализа с использованием программного обеспечения *FEMM*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические зависимости для определения условий возникновения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с ДЗО и ПМ, учитывающие электромагнитное взаимодействие пространственных гармонических составляющих МДС ДЗО, МДС поля ПМ и гармоник удельной эквивалентной магнитной проводимости воздушного зазора при односторонней зубчатости со стороны статора.
2. Аналитические зависимости, описывающие образование низкочастотных составляющих радиальных электромагнитных сил, учитывающие электромагнитное взаимодействие пространственных гармонических составляющих МДС ДЗО, МДС поля ПМ и гармоник удельной эквивалентной магнитной

проводимости воздушного зазора при односторонней зубчатости со стороны статора.

3. Аналитическое выражение обмоточного коэффициента ДЗО, выполненных из двух элементарных и уложенных в отдельных пазах, позволяющее обосновать выбор величины пространственного сдвига между элементарными обмотками и их взаимное включение, обеспечивающие подавление нежелательных пространственных гармонических составляющих МДС обмотки.

4. Результаты гармонического анализа МДС ДЗО, выполненных в виде двух элементарных обмоток, уложенных в отдельных пазах.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, определяются обоснованностью принятых допущений, использованием устоявшихся в области электрических машин методов расчета и взаимодополняющих методов численного моделирования.

Работа выполнялась в рамках программы НИОКР НГТУ (№ С21-25 «Анализ современных методов улучшения гармонического состава магнитного поля в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками»; № С23-15 «Анализ добавочных электромагнитных сил в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками с магнитоэлектрическим возбуждением»).

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: Международная конференция «ICOECS. International conference on electrotechnical complexes and systems» (г. Уфа, 2019 г.); XIX Международная конференция «Электротехника. Электротехнологии. Электротехнические. Материалы и компоненты. МКЭЭЭ–2022» (г. Алушта, 2022 г.); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2021, 2023 гг.).

Личный вклад автора заключался в постановке цели и определении задач исследования (совместно с научным руководителем), анализе представленных в научно-технической литературе подходов к улучшению гармонического состава МДС в электрических машинах с ДЗО и ПМ, выборе критериев сравнения данных подходов и установлении эффективности их применения для рассматриваемого класса машин, проведении численного моделирования методом конечно-элементного анализа, установлении аналитических зависимостей, а также в обобщении и анализе полученных результатов.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 11 печатных работах, из них в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук – 5, в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science – 2, в материалах и трудах всероссийских и международных научных конференций - 3, зарегистрирован 1 патент на полезную модель.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 2 приложений. Текст работы изложен на 154 страницах, включая 35 рисунков, 19 таблиц и библиографический список, состоящий из 92 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель работы, поставлены задачи для ее достижения, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлена общая характеристика электрических машин с ДЗО и ПМ, описана особенность построения ДЗО. Показаны преимущества применения такого типа электрических машин.

Рассматриваемые обмотки имеют число пазов на полюс и фазу $q<1$ и определяются выражением:

$$q = \frac{c}{d} < 1. \qquad (1)$$

ДЗО образуются из нескольких одинаковых участков, называемых фазными зонами. При этом число фазных зон кратно числу фаз m. Для трехфазных обмоток с нечетным d число фазных зон $m_з$ равно $m_з=2m=6$, а для обмоток с четным d число фазных зон равняется $m_з=m=3$. Каждая фазная зона состоит из c числа катушек, включенных между собой последовательно, каждая из которых охватывает один зубец.

Рассмотрены особенности гармонического состава МДС, создаваемой ДЗО. Показано, что такие обмотки создают МДС, в гармоническом составе которой можно выделить две пространственные гармоники, имеющие высокую амплитуду, близкое число полюсов и вращающиеся в противоположных направлениях. Каждая из этих гармоник может выступать в качестве рабочей. Такие гармоники называются основными. ДЗО также создают широкий спектр нерабочих гармоник МДС: как волны низких порядков, так и высшие гармонические составляющие. На рисунке 1 и рисунке 2 показаны амплитуды МДС ДЗО с q=2/5(2/7) и q=3/8(3/10). Ряд нерабочих гармоник МДС вызывает следующие негативные эффекты: образование добавочных электромагнитных моментов, возникновение вихревых токов в постоянных магнитах, возникновение добавочных магнитных потерь в магнитопроводе, появление радиальных сил, приводящих к созданию магнитных вибраций и шума, высокий уровень дифференциального рассеяния.

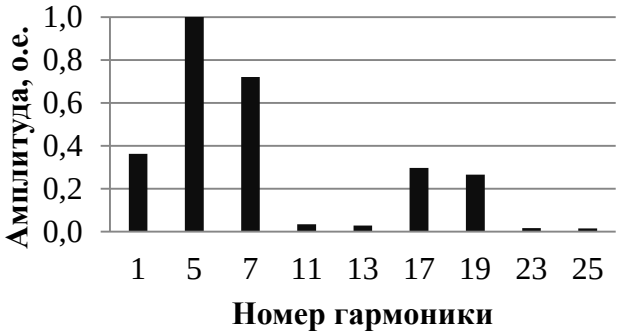


Рисунок 1 - Относительные амплитуды МДС ДЗО с q=2/5

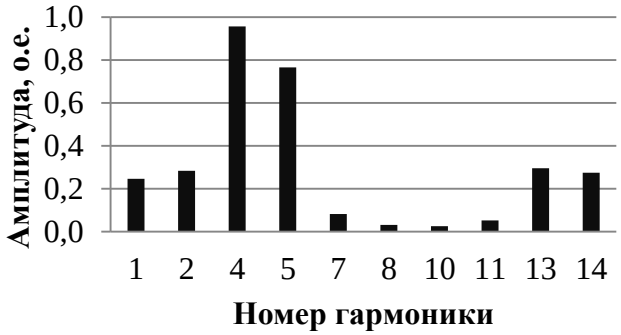


Рисунок 2 - Относительные амплитуды МДС ДЗО с q=3/8

Представлен обзор подходов к улучшению гармонического состава МДС, создаваемой ДЗО. Рассмотрены особенности реализации следующих подходов: введение в магнитную цепь «магнитных барьеров» - областей с низкой магнитной проводимостью, увеличение числа слоев обмотки, питание обмотки от нескольких независимых источников, построение обмотки из двух элементарных, уложенных в отдельных пазах.

Во второй главе приведены результаты исследования образования пульсаций момента в машинах с ДЗО и ПМ с использованием метода гармонических составляющих. Рассмотрено образование момента при взаимодействии гармоник МДС, создаваемой ДЗО, гармоник МДС возбуждения, образованных ПМ, постоянной и гармониками переменной эквивалентной магнитной проводимости.

При проведении исследования были приняты следующие допущения: магнитная проницаемость стали сердечников бесконечно велика; ток каждого из пазов заменен на поверхностный ток, распределенный тонким слоем по поверхности магнитопровода, вид кривой плотности поверхностного тока непрерывно изменяется в соответствии с изменением токов в пазах; воздушный зазор равномерный и гладкий, а зубчатой структуре сердечников соответствует эквивалентная удельная проводимость воздушного зазора, отражающая действительный пространственный характер распределения зубцовых проводимостей; величина воздушного зазора мала по сравнению с радиусом статора и полюсным делением.

Образование момента, действующего на ротор, можно представить как результат взаимодействия магнитной индукции и эквивалентной поверхностной плотности тока:

$$M = l_\delta R^2 \int_0^{2\pi} B_\delta\left(\alpha,t\right)\times j\left(\alpha,t\right)d\alpha\,, \tag{2}$$

где l_δ – расчетная длина воздушного зазора, R – средний радиус воздушного зазора, $B_\delta(\alpha,t)$ - магнитная индукция в воздушном зазоре, изменяющаяся в пространстве и времени, $j(\alpha,t)$ - поверхностная плотность тока, соответствующая пространственному распределению МДС.

Поверхностную плотность тока можно выразить в виде производной МДС по угловой координате α:

$$j\left(\alpha,t\right)=\frac{dF\left(\alpha,t\right)}{Rd\alpha}\,. \tag{3}$$

где $F(\alpha,t)$ - результирующая МДС, равная сумме МДС статора, созданной ДЗО, и МДС ротора, образованной ПМ:

$$F\left(\alpha,t\right)=F_\nu\left(\alpha,t\right)+F_k\left(\alpha,t\right), \tag{4}$$

здесь $F_\nu(\alpha,t)$ – МДС статора, $F_k(\alpha,t)$ - МДС ротора.

Как было отмечено выше, ДЗО создают бесконечный ряд гармоник МДС, вращающихся в противоположных направлениях. МДС, созданная трехфазной ДЗО, при протекании по ней симметричной системы токов прямой последовательности:

$$F_\nu\left(\alpha,t\right)=\sum_{\nu=1}^{\infty}F_{\nu m}\cos\left(\omega t\mp\nu\alpha\right), \tag{5}$$

где ν – номер пространственной гармоники МДС, $F_{\nu m}$ – амплитуда ν-й гармоники МДС, ω – угловая частота протекающих по обмотке токов.

Учитывая многообразие конфигураций конструкции роторов с применением ПМ, кривую МДС ПМ в общем виде необходимо представить в виде бесконечного гармонического ряда:

$$F_k\left(\alpha,t\right)=\sum_{k=1}^{\infty}F_{km}\cos\left(kp\left(\omega_r t-\alpha\right)\right), \tag{6}$$

где k – номер пространственной гармоники МДС, F_{km} – амплитуда k-й гармоники МДС, p – число пар полюсов ротора, ω_r – угловая частота вращения ротора.

Учитывая (5) и (6), выражение (4) можно записать в виде:

$$F\left(\alpha,t\right)=\sum_{\nu=1}^{\infty}F_{\nu m}\cos\left(\omega t\mp\nu\alpha\right)+\sum_{k=1}^{\infty}F_{km}\cos\left(kp\left(\omega_r t-\alpha\right)\right). \tag{7}$$

Тогда поверхностную плотность тока, образованную результирующей МДС, с использованием (7) можно представить в виде:

$$j(\alpha,t)=\sum_{\nu=1}^{\infty} j_{\nu m}\cos\left(\omega t\mp\nu\alpha+\frac{\pi}{2}\right)+\sum_{k=1}^{\infty} j_{km}\cos\left(kp(\omega_r t-\alpha)+\frac{\pi}{2}\right), \quad (8)$$

где $j_{\nu m}$ – амплитуда поверхностной плотности тока, образованная ν-й гармоникой МДС обмотки статора, j_{km} - амплитуда поверхностной плотности тока, образованная k-й гармоникой МДС постоянных магнитов ротора.

Если пренебречь магнитным сопротивлением стали, то мгновенное значение магнитной индукции в данной точке воздушного зазора определяется произведением МДС в данной точке в данный момент времени и удельной магнитной проводимости воздушного зазора:

$$B_\delta(\alpha,t)=F(\alpha,t)\times\Lambda(\alpha). \quad (9)$$

В настоящей работе рассмотрен случай, когда воздушный зазор между статором и ротором изменяется вдоль внутренней поверхности сердечника статора машины за счет зубчатой конструкции статора. Данная постановка задачи справедлива при размещении постоянных магнитов с радиальной намагниченностью на поверхности цилиндрического ротора, поскольку магнитная проводимость постоянных магнитов незначительно отличается от магнитной проводимости воздуха. Эскиз такой магнитной системы представлен на рисунке 3. Для общего описания функцию удельной эквивалентной магнитной проводимости воздушного зазора необходимо представить в виде бесконечного гармонического ряда:

$$\Lambda(\alpha)=\Lambda_0+\sum_{\varepsilon=1}^{\infty}\Lambda_{\varepsilon m}\cos(\varepsilon Z_1\alpha), \quad (10)$$

где Λ_0 – постоянная составляющая магнитной проводимости, Z_1 – число пазов статора, ε – порядок гармоники магнитной проводимости $\Lambda_{\varepsilon m}$ - амплитуда ε-й гармоники магнитной проводимости.

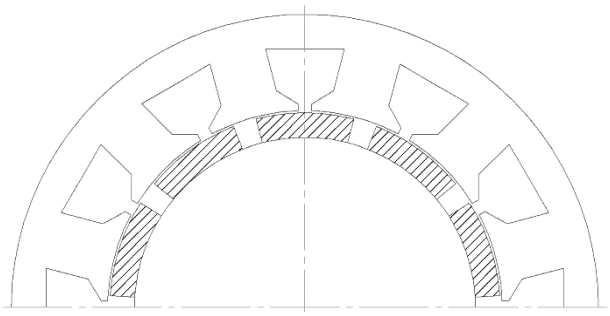


Рисунок 3 - Эскиз магнитной системы

Подставив в (9) выражения (7) и (10), получим:

$$B_\delta(\alpha,t)=\left[\sum_{\nu=1}^{\infty}F_{\nu m}\cos(\omega t\mp\nu\alpha)+\sum_{k=1}^{\infty}F_{km}\cos(kp(\omega_r t-\alpha))\right]\times$$
$$\times\left[\Lambda_0+\sum_{\varepsilon=1}^{\infty}\Lambda_{\varepsilon m}\cos(\varepsilon Z_1\alpha)\right]. \quad (11)$$

Исходя из (8) и (11), выражение момента (2) можно записать в виде:

$$M=l_\delta R^2\int_0^{2\pi}\left[\sum_{\nu=1}^{\infty}F_{\nu m}\cos(\omega t\mp\nu\alpha)+\sum_{k=1}^{\infty}F_{km}\cos(kp(\omega_r t-\alpha))\right]\times\left[\Lambda_0+\sum_{\varepsilon=1}^{\infty}\Lambda_{\varepsilon m}\cos(\varepsilon Z_1\alpha)\right]$$
$$\times\left[\sum_{\nu=1}^{\infty}j_{\nu m}\cos\left(\omega t\mp\nu\alpha+\frac{\pi}{2}\right)+\sum_{k=1}^{\infty}j_{km}\cos\left(kp(\omega_r t-\alpha)+\frac{\pi}{2}\right)\right]d\alpha. \quad (12)$$

Анализ выражения (12) показал, что в образовании момента участвуют лишь подынтегральные члены, которые не содержат аргумента α, так как результатом интегрирования периодических тригонометрических функций, содержащих α, от 0 до 2π по $d\alpha$ будет нуль.

При гладком немагнитном зазоре, т.е. согласно (12) удельная эквивалентная магнитная проводимость представлена только постоянной составляющей Λ_0, можно выделить два варианта создания момента:

1. Основной электромагнитный момент. Однонаправленное преобразование энергии возможно в результате взаимодействия гармоник магнитного поля, вращающихся с одинаковой скоростью и имеющих одинаковое число полюсов, т.е. когда ротор выполнен с числом полюсов, соответствующим одной из основных гармоник МДС обмотки.
2. Пульсации момента. Данный вариант создания момента возможен, когда порядок высших гармоник поля возбуждения совпадает с порядком гармоник поля якоря, но скорости их вращения отличны. Образование такого момента возможно для любой ДЗО вне зависимости от выбора рабочей гармоники. В работе приведены номера пространственных гармоник МДС, создаваемой ДЗО, гармоник МДС ПМ, приводящих к образованию пульсаций момента для наиболее распространенных ДЗО: q=1/2 (q=1/4), q=3/8 (q=3/10), q=2/5 (q=2/7), q=4/11 (q=4/13).

При учете зубчатости со стороны статора, т.е. когда в выражении (12) удельная эквивалентная магнитная проводимость представлена гармоническим рядом, возможны следующие варианты создания момента:

1. При взаимодействии пространственных гармоник МДС ПМ и гармоник удельной эквивалентной магнитной проводимости. Эти моменты называются «зубцовыми», и они обусловлены притяжением ПМ к магнитопроводу статора и возникают, когда обмотка якоря обесточена.
2. При взаимодействии комбинации гармонических составляющих обмотки, ПМ и удельной эквивалентной магнитной проводимости. В работе приведены некоторые комбинации для наиболее распространенных ДЗО: q=1/2 (q=1/4), q=3/8 (q=3/10), q=2/5 (q=2/7), q=4/11 (q=4/13). Таких комбинаций существует бесконечное множество, но следует отметить, что имеет место образование пульсаций момента для основных гармоник исследуемых функций вне зависимости от выбора рабочей гармоники ДЗО. Такие пульсации возникают для основной (зубцовой) гармоники удельной эквивалентной магнитной проводимости (ε=1) при взаимодействии основной пространственной гармоникой МДС ПМ и с основной гармоникой МДС обмотки, вращающейся в противоположном направлении.

В третьей главе приведены результаты исследования образования радиальных сил в машинах с ДЗО и ПМ методом гармонических составляющих. Проведен анализ образования радиальных сил низких порядков при взаимодействии гармоник МДС обмотки, гармоник МДС возбуждения, образованных ПМ, постоянной и гармониками переменной удельной эквивалентной магнитной проводимости. При проведении исследования принимались допущения, аналогичные приведенным в предыдущей главе.

В электрических машинах между статором и ротором в процессе работы возникают магнитные радиальные силы, изменяющиеся во времени и пространстве. Под действием этих сил происходит деформация ярма статора, приводящая к его колебаниям. Вибрации и шум, вызванные этими колебаниями, называют магнитными. Общее выражение бегущей волны радиальной силы имеет вид:

$$F_r\left(\alpha,t\right)=F_{r.m}\cos\left(\Omega_r t-r\alpha\right) \qquad (13)$$

где r – порядок радиальной силы, Ω_r – угловая частота гармоники силы порядка r.

Наиболее важны случаи, когда порядок радиальных сил r=0,1 2,3. Эти силы могут вызывать значительные деформации статора и, соответственно, вибрации, поскольку период пространственной волны достаточно велик. С ростом порядка волны плечо силы уменьшается, и амплитуда колебаний падает.

На рисунке 4 изображено пространственное распределение сил различных порядков, вызывающих деформацию кольца статора:

1. $r = 0$. Составляющая этого порядка не перемещается в пространстве, но периодически изменяется во времени. В этом случае на статор оказывается пульсирующее усилие растяжения-сжатия.
2. $r = 1$. Данная составляющая соответствует одностороннему притяжению ротора к статору. Это притяжение изменяется во времени и перемещается в пространстве.
3. $r = 2,3$. Эти составляющие радиальной силы приводят к изгибным деформациям статорного кольца.

В настоящей работе рассмотрены условия образования радиальных сил низкого порядка r=0,1,2,3.

Используя тензор натяжений Максвелла, радиальную силу на единицу площади в любой точке воздушного зазора можно выразить через индукцию магнитного поля в воздушном зазоре:

$$F_r(\alpha,t)=\frac{B_\delta^2\left(\alpha,t\right)}{2\mu_0}, \qquad (14)$$

где $B_\delta(\alpha,t)$ - мгновенное значение магнитной индукции.

В ходе анализа радиальных сил рассматривалась конструкция магнитной системы, аналогичная представленной в предыдущей главе (рисунок 3). Тогда используя полученное выше выражение магнитной индукции (11), радиальную силу можно записать как:

$$F_r(\alpha,t)=\frac{1}{2\mu_0}\times\left\{\left[\sum_{\nu=1}^{\infty}F_{\nu m}\cos\left(\omega t\mp\nu\alpha\right)+\sum_{k=1}^{\infty}F_{km}\cos\left(kp\left(\omega_r t-\alpha\right)\right)\right]\times\right.$$
$$\left.\times\left[\Lambda_0+\sum_{\varepsilon=1}^{\infty}\Lambda_{\varepsilon m}\cos\left(\varepsilon Z_1\alpha\right)\right]\right\}^2. \qquad (15)$$

Анализ выражения (15) позволил выделить набор пространственно-временных функций $f(\alpha,t)$, описывающих распределение сил в рассматриваемой системе. Порядок исследуемых радиальных сил определяется значением пространственного коэффициента при переменной α. Таким образом, рассматривались слагаемые, в которых коэффициент при α равен 0,1,2,3.

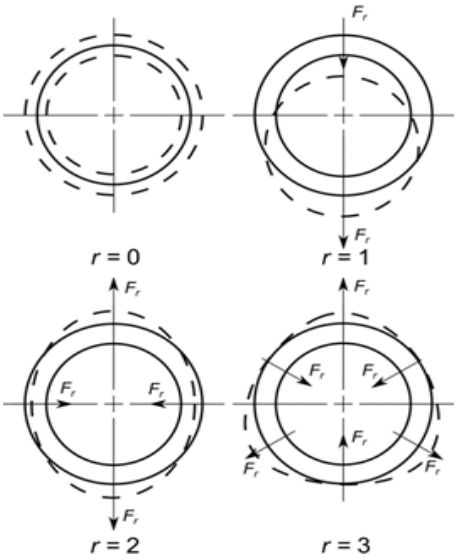


Рисунок 4 – Пространственное распределение сил

При гладком немагнитном зазоре, т.е. согласно (15) при умножении выражения результирующей МДС на постоянную составляющую удельной магнитной проводимости (Λ_0) возникают радиальные силы низких порядков, источником которых являются:

1. Гармоники МДС, созданные ДЗО, имеющие близкий порядок и вращающиеся в разных направлениях. При этом порядок радиальных сил будет различен для обмоток с разным числом фазных зон.

1.1. Для обмоток с нечетным d, согласно (1), когда число фазных зон равно шести, образуются радиальные силы второго порядка r=2 в результате взаимодействия гармоник МДС, номера которых отличаются на два. При этом из-за структуры этих обмоток они создают бесконечное количество таких пар гармоник, т.е. образуется ряд сил, имеющих одну скорость вращения, но разные амплитуды.

1.2. Для обмоток с четным d, согласно (1), когда число фазных зон равно трем, образуются радиальные силы первого r=1 и второго r=2 порядков. В гармоническом составе МДС таких обмоток имеют место пары гармоник, номера которых могут отличаться на один или на два. Как и для случая с нечетным d, существует бесконечное количество таких пар гармоник.

2. Взаимодействие гармоник МДС, созданных ДЗО, с гармониками МДС ПМ. Согласно результатам исследования, при различных комбинациях гармоник МДС якоря и МДС возбуждения возможно создание радиальных сил низких порядков. Однако в работе детально рассмотрены условия образования исследуемых радиальных сил, полученных в процессе взаимодействия основных гармоник (обладающих наибольшей амплитудой) рассматриваемых функций:

2.1. Радиальные силы порядка r=0 возникают при взаимодействии основной гармоники МДС ПМ и одной из основных гармоник МДС ДЗО, вращающихся сонаправленно. При этом радиальные силы такого порядка возникают в машинах с ДЗО вне зависимости от числа фазных зон обмотки.

2.2. В электрических машинах с ДЗО с шестью фазными зонами возникают радиальные силы порядка r=2, а с ДЗО с тремя фазными зонами - порядка r=1. Для обоих типов обмоток причиной создания радиальных сил является взаимодействие основной гармоники МДС ПМ и одной из основных гармоник МДС обмотки, имеющей близкий порядок и противоположное направление вращения.

При учете зубчатости со стороны статора, т.е. согласно (15) при умножении выражения результирующей МДС на ряд магнитной проводимости возможно бесконечное количество вариантов комбинаций гармоник МДС якоря, МДС возбуждения и удельной эквивалентной магнитной проводимости, приводящих к образованию исследуемых радиальных сил. Следовательно, возможно выявить условие образования радиальной силы при высоких порядках МДС и/или проводимости. Однако амплитуда функции снижается с ростом порядка ее гармоники. В ходе исследования переменная составляющая эквивалентной удельной магнитной проводимости воздушного зазора была ограничена основной (зубцовой) гармоникой, имеющей максимальную амплитуду. Результаты исследования показывают, что источниками создания радиальных сил низкого порядка в таком случае являются:

1. Взаимодействие МДС ПМ и переменной магнитной проводимости. В электрических машинах с ДЗО с шестью фазными зонами образуются радиальные силы порядка r=2, а с ДЗО с тремя фазными зонами - порядка r=1. Такие радиальные силы можно объяснить тем, что число пар полюсов поля возбуждения, близко к числу зубцов статора.

2. Взаимодействие результирующей МДС и переменной эквивалентной удельной магнитной проводимости воздушного зазора. В электрических машинах с ДЗО как с тремя, так и с шестью фазными зонами имеет место образование радиальных сил порядка r=0. Такие силы возникают для основной гармоники

эквивалентной удельной магнитной проводимости при взаимодействии основной гармоники МДС возбуждения и основной гармоникой МДС обмотки, вращающейся в противоположном направлении.

3. Взаимодействие результирующей МДС и переменной магнитной проводимости. В электрических машинах с ДЗО с шестью фазными зонами имеет место образование радиальных сил порядка r=2, а в машинах с ДЗО с тремя фазными зонами - порядка r=1. Такие силы возникают для основной гармоники эквивалентной удельной магнитной проводимости при взаимодействии основной гармоникой МДС возбуждения и основной гармоникой МДС обмотки, вращающихся сонаправленно.

В четвертой главе представлен комплексный анализ способов улучшения гармонического состава МДС, созданной ДЗО, которые были представлены в рамках первой главы. Следует отметить, что исследования об улучшении гармонического состава МДС обмотки, как правило, ограничиваются непосредственно предлагаемым подходом. В данной главе проведено сравнение различных подходов по ряду выбранных критериев, включая оценку их эффективности и анализ их влияния на параметры и характеристики электрической машины.

Результаты применения исследуемых подходов оценивались с использованием программного обеспечения, реализующего метод конечно-элементного анализа, *FEMM*. В качестве объекта исследования рассматривалась электрическая машина, имеющая двухслойную ДЗО с числом пазов на полюс и фазу q=2/5. Эскиз данной машины представлен на рисунке 3, схема обмотки представлена на рисунке 5. Гармонический состав МДС, создаваемой такой обмоткой представлен на рисунке 1. В нем следует выделить гармоники, обладающие наибольшей амплитудой: первую, пятую рабочую (основную прямобегущую) и седьмую (основную обратнобегущую).

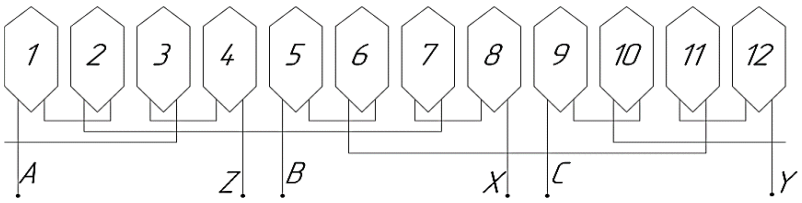


Рисунок 5 – Схема исследуемой обмотки

Приведенные способы улучшения гармонического состава МДС рассматривались на основе модели без изменения геометрических размеров, в частности, величины воздушного зазора и величины фазного тока.

Критериями, используемыми в ходе сравнения, являются: $B_{\delta.\nu}$ – амплитуда ν-й гармоники магнитной индукции воздушного зазора; $k_{об.5}$ – обмоточный коэффициент пятой рабочей гармоники; M_{const} – постоянная составляющая электромагнитного момента; M_{rip} – пульсация электромагнитного момента относительно постоянной составляющей; F_{r2} – вторая пространственная гармоника радиальной силы в воздушном зазоре; $B_{m.const}$ – постоянная составляющая индукции постоянных магнитов; $B_{m.rip}$ – пульсация индукции постоянных магнитов относительно постоянной составляющей; L_d – индуктивность обмотки по продольной оси, L_q – индуктивность обмотки по поперечной оси. В рамках главы приведена методика расчета и обоснован выбор каждого из параметров в качестве критерия сравнения. Моделирование выполнялось в двух режимах: без учета эффекта насыщения стали магнитопровода и с его учетом. Результаты представленных способов улучшения гармонического состава МДС ДЗО проведены в таблицах 1 и 2.

Как показано в таблице 1, основная часть анализируемых способов приводит к снижению первой субгармоники магнитной индукции. Применение двух элементарных обмоток приводит к снижению седьмой обратнобегущей гармоники (основной гармоники, не являющейся рабочей).

Таблица 1 – Результаты без насыщения

		Исходная обмотка	Магнитные барьеры в ярме	Магнитные барьеры в зубце	Четырехслойная обмотка	Питание от двух источников	Две элементарные обмотки
$B_{\delta,\nu}$, %	ν=1	100	100	23	26	0	74
	ν=5	100	100	94	97	103	90
	ν=7	100	100	104	97	103	11
$k_{об.5}$		0,917	0,92	0,915	0,887	0,917	0,906
M_{const}, Н·м		23,0	23,0	22,8	22,2	19,9	22,4
M_{rip}, %		6,5	6,4	8,0	6,4	8,8	0,7
F_{r2}, Н		0,545	0,545	0,583	0,527	0,524	0,085
$B_{m.const}$, Тл		1,27	1,27	1,25	1,27	1,27	1,26
$B_{m.rip}$, %		4,9	5,9	4,8	3,2	10,5	2,6

Таблица 2 – Результаты с насыщением

		Исходная обмотка	Магнитные барьеры в ярме	Магнитные барьеры в зубце	Четырехслойная обмотка	Питание от двух источников	Две элементарные обмотки
$B_{\delta,\nu}$, %	ν=1	100	5	52	44	7	212
	ν=5	100	98	94	98	102	100
	ν=7	100	98	102	98	102	11
M_{const}, Н·м		21,0	20,4	20,6	20,3	18,0	20,0
M_{rip}, %		6,1	7,1	7,1	4,9	8,5	1,6
F_{r2}, Н		0,331	0,316	0,324	0,32	0,253	0,048
$B_{m.const}$, Тл		1,23	1,22	1,21	1,23	1,24	1,20
$B_{m.rip}$, %		3,5	5,2	2,9	2,4	4,1	1,6
L_d, мГн		4	3,4	3,8	3,7	1,9/1,9	2,3
L_q, мГн		5,1	5,1	5,1	4,7	2,6/2,6	3,1

В главе, посвященной исследованию пульсаций момента, было показано, что имеет место возникновение пульсации момента при односторонней зубчатости со стороны статора с участием основной гармоники МДС обмотки, не являющейся рабочей. В главе, посвященной исследованию электромагнитных радиальных сил, установлено, что в электрических машинах, имеющих ДЗО с шестью фазными зонами, одной из которых является исследуемая обмотка, как при гладком воздушном зазоре, так и при односторонней зубчатости, возникают силы второго порядка, в создании которых также участвует основная обратнобегущая гармоника МДС обмотки. Следовательно, уменьшение основной обратнобегущей гармоники МДС обмотки должно приводить к снижению пульсаций момента и радиальных сил второго порядка. С использованием численного моделирования определено, что достичь такого эффекта позволяет подход, основанный на выполнении обмотки из двух элементарных, уложенных в отдельных пазах. Таким образом, можно сделать вывод о корректности представленной теории и полученных аналитических выражений в рамках второй и третьих глав диссертации.

Учитывая вышеизложенное, способ выполнения ДЗО из двух элементарных, уложенных в отдельных пазах, можно рекомендовать для улучшения ряда параметров и характеристик электрических машин с ДЗО и ПМ. Представленные результаты показывают, что данный подход позволяет уменьшить возникающие пульсации момента, низкочастотную составляющую радиальной силы, пульсации

магнитной индукции в объеме ПМ и индуктивность обмотки, без значительного снижения обмоточного коэффициента рабочей гармоники. Необходимо отметить особенность данного способа - катушка охватывает два зубца, а не один, как в случае классических ДЗО, что исключает возможность автоматизированной челночной намотки в паз. Однако длина лобовых частей по-прежнему остается значительно короче, чем в обмотках с целым q.

В пятой главе приведены результаты гармонического анализа ДЗО, выполненных из двух элементарных и уложенных в отдельных пазах. Статор выполняется с удвоенным числом пазов, а элементарные обмотки укладываются в отдельные пазы с определенным пространственным сдвигом $\alpha_Д$. Применение подхода построения ДЗО из двух элементарных рассмотрено другими исследователями только для обмоток с числом пазов на полюс и фазу q=2/5 (рисунок 6) и q=3/8 (рисунок 7). Как показано на этих рисунках, угол сдвига между элементарными обмотками $\alpha_Д$ различен для разных обмоток. Для распространения способа построения ДЗО из двух элементарных, уложенных в отдельных пазах с определенным сдвигом, на весь класс исследуемых обмоток получено аналитическое выражение МДС обмотки в зависимости от угла сдвига между обмотками.

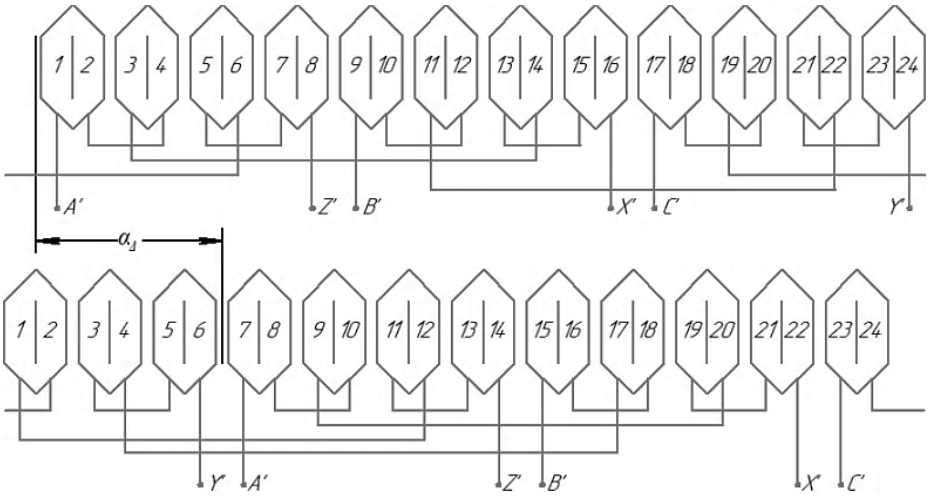


Рисунок 6 – Схема обмоток с q=2/5

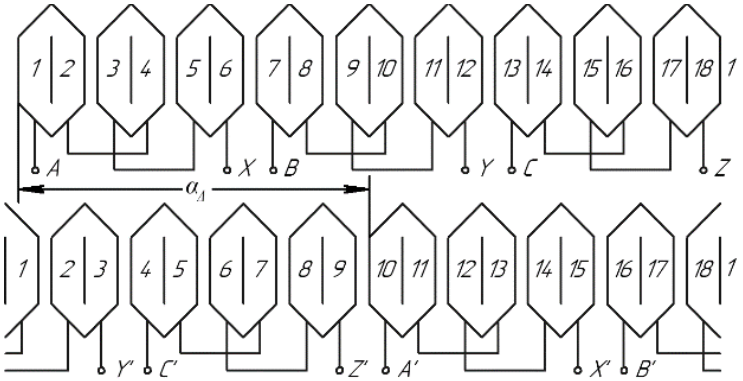


Рисунок 7 – Схема обмоток с q=3/8

В ходе проведения гармонического анализа МДС рассматриваемой обмотки приняты следующие допущения: магнитная проницаемость стали сердечников бесконечно велика, воздушный зазор равномерный и гладкий.

Каждую из частей обмотки можно представить в виде системы контуров. МДС любого такого контура можно изобразить в виде прямоугольника. На рисунке 8 приведено распределение МДС первых контуров фазных зон фаз элементарных обмоток A и A'. Эти контуры сдвинуты друг относительно друга на угол $\alpha_Д$ в

пространстве. Величина МДС таких контуров равна $w_k i_k$, где w_k - число витков катушки контура, i_k - мгновенное значение тока катушки контура.

В главе представлено разложение МДС контура в гармонический ряд. После чего переходя от МДС контура к МДС фазной зоны и в конце к МДС обмотки, получено выражение для амплитуды ν-й гармоники МДС обмотки, выполненной из двух элементарных и уложенных в отдельных пазах с определенным сдвигом, когда элементарные обмотки включены последовательно:

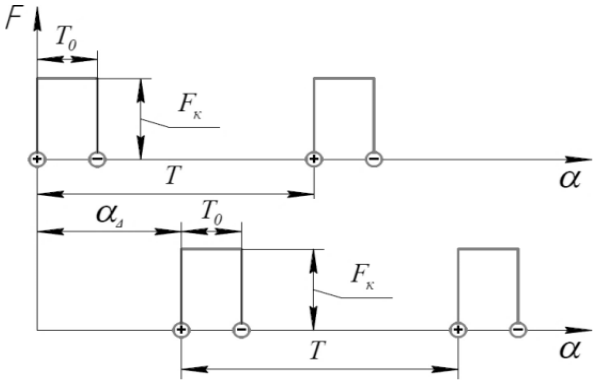


Рисунок 8 – Взаимное расположение МДС контуров первой и второй частей обмотки

$$F_{\nu m} = 2\frac{m\sqrt{2}}{\nu\pi} Iwck_{об} = 2\frac{m\sqrt{2}}{\nu\pi} Iwck_{y\nu}k_{\text{р}\nu}k_{сд\nu}\,. \qquad (16)$$

Здесь w - число последовательно включенных витков каждой обмотки: $w=w_k c$ для обмотки с тремя фазными зонами, $w=2w_k c$ для обмотки с шестью фазными зонами.

В отличие от классической теории электрических машин, где обмоточный коэффициент есть произведение коэффициента укорочения $k_{y\nu}$ и коэффициента распределения $k_{p\nu}$, в обмоточный коэффициент ДЗО, выполненной из двух элементарных, дополнительно введен коэффициент сдвига ν-ой гармоники $k_{сд\nu}$:

$$k_{сд\nu} = \cos\left(\frac{\nu\alpha_\Delta}{2}\right). \qquad (17)$$

Этот коэффициент зависит от пространственного сдвига между обмотками $\alpha_Д$. Таким образом, варьируя угол сдвига между элементарными обмотками можно добиться снижения обмоточного коэффициента и, соответственно, амплитуды какой-либо конкретной пространственной гармоники МДС. Однако необходимо принимать во внимание, что величина угла сдвига между обмотками также влияет и на другие гармоники МДС, в том числе на выбранную в качестве рабочей.

Кроме описанного выше, также рассмотрен вариант, когда элементарные обмотки включены встречно. В этом случае коэффициент сдвига ν-ой гармоники принимает вид:

$$k_{сд\nu} = \sin\left(\frac{\nu\alpha_\Delta}{2}\right). \qquad (18)$$

Таким образом, используя какой-либо из вариантов включения элементарных обмоток можно добиться снижения обмоточного коэффициента определенной гармоники МДС ДЗО. В четвертой главе диссертации было показано, что снижение одной из основных гармоник МДС, не являющейся рабочей, приводит к уменьшению ряда негативных эффектов. В рамках реализации данного подхода предложены варианты включения элементарных обмоток и выбрана величина угла сдвига между обмотками, позволяющие достичь значительного снижения обмоточного коэффициента одной основной гармоники МДС обмотки без существенного снижения обмоточного коэффициента основной рабочей гармоники для наиболее часто используемых ДЗО: q=1/2 (q=1/4), q=3/8 (q=3/10), q=2/5 (q=2/7), q=4/11 (q=4/13). На рисунках 9-12 показано влияние исследованного подхода для рассмотренных ДЗО на относительные амплитуды гармоник МДС, т.е. амплитуды гармоники МДС, отнесенные к полному току катушки:

$$F_{\nu}^{*} = \frac{F_{\nu m}}{Iw_k} \,. \tag{19}$$

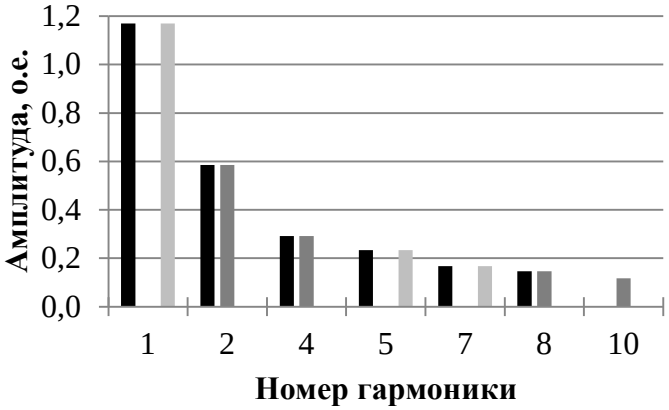


Рисунок 9 - Относительные амплитуды гармоник МДС ДЗО с q=1/2 (1/4)

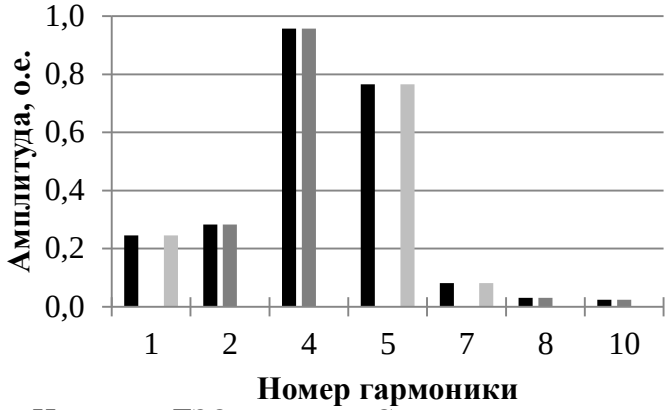


Рисунок 10 - Относительные амплитуды гармоник МДС ДЗО с q=3/8 (3/10)

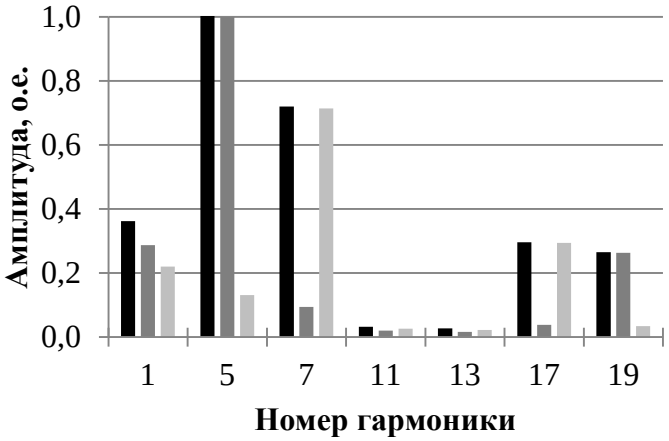


Рисунок 11 - Относительные амплитуды гармоник МДС ДЗО с q=2/5 (2/7)

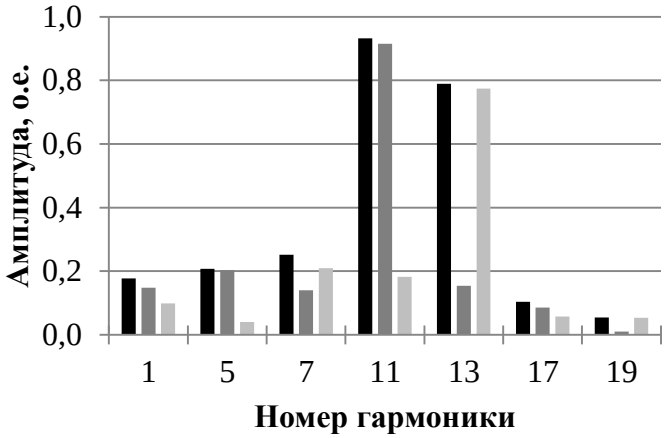


Рисунок 12 - Относительные амплитуды гармоник МДС ДЗО с q=4/11 (4/13)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Улучшение пространственного гармонического состава магнитодвижущей силы дробных зубцовых обмоток, а именно уменьшение гармонических составляющих магнитодвижущей силы, не являющихся рабочими, является эффективным подходом к снижению нежелательных добавочных электромагнитных моментов и электромагнитных радиальных сил в синхронных электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками и постоянными магнитами. На основании проведенных исследований сформулированы следующие выводы.

1. Установлены аналитические зависимости, определяющие условия образования пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с ДЗО и ПМ, обусловленных электромагнитным взаимодействием МДС обмотки, МДС поля ПМ и удельной эквивалентной магнитной проводимости. С использованием полученных аналитических выражений определены порядковые номера гармоник

исследуемых функций, являющихся причиной возникновения пульсаций электромагнитного момента как при гладком немагнитном зазоре, так и при односторонней зубчатости со стороны статора для наиболее распространенных ДЗО.

2. Показано, что при гладком немагнитном зазоре пульсации электромагнитного момента возникают при взаимодействии высших гармонических составляющих МДС магнитов с высшими гармоническими составляющими МДС обмотки, порядок которых совпадает, но скорости их вращения различны.

3. Установлено, что при учете односторонней зубчатости со стороны статора для электрических машин с любой ДЗО имеет место образование пульсаций момента для основных гармоник исследуемых функций, обладающих наибольшей амплитудой. Этот пульсирующий момент возникает для основной гармоники удельной эквивалентной магнитной проводимости при взаимодействии основной гармоники МДС ПМ с одной из основных гармоник МДС обмотки, вращающейся в противоположном направлении.

4. Установлены аналитические зависимости, описывающие возникновение низкочастотных составляющих радиальной электромагнитной силы, приводящих к вибрациям активных частей электрических машин с ДЗО и ПМ, и являющихся результатом взаимодействия пространственных гармонических составляющих МДС ДЗО, МДС поля ПМ и гармоник удельной эквивалентной магнитной проводимости воздушного зазора. С использованием полученных аналитических выражений определены порядковые номера гармоник исследуемых функций, являющихся причиной возникновения низкочастотных составляющих радиальной электромагнитной силы, для наиболее распространенных ДЗО.

5. Показано, что при гладком немагнитном зазоре существуют условия создания радиальных сил низкого порядка с участием основных гармоник, обладающих наибольшей амплитудой, МДС обмотки и МДС магнитов. В машинах с любой ДЗО вне зависимости от числа фазных зон возникают радиальные силы нулевого порядка при взаимодействии гармоник МДС обмотки и МДС магнитов, вращающихся в одном направлении. Кроме этого, в электрических машинах с ДЗО с шестью фазными зонами образуются радиальные силы второго порядка, а машинах с ДЗО с тремя фазными зонами – первого и второго порядков. Такие силы возникают при взаимодействии основной гармоники МДС магнитов и одной из основных гармоник МДС обмотки, имеющей противоположное направление вращения.

6. Установлено, что при односторонней зубчатости со стороны статора существуют условия создания радиальных сил низкого порядка при взаимодействии основных гармоник, обладающих наибольшей амплитудой, МДС обмотки и МДС магнитов. В машинах с любой ДЗО вне зависимости от числа фазных зон возникают радиальные силы нулевого порядка. Такие силы возникают для основной гармоники удельной эквивалентной магнитной проводимости при взаимодействии основной гармоники МДС поля ПМ и одной из основных гармоник МДС обмотки, вращающейся в противоположном направлении. Кроме этого, в электрических машинах с ДЗО с шестью фазными зонами возникают радиальные силы второго порядка, а в машинах с ДЗО с тремя фазными зонами – первого порядка. Такие силы возникают для основной гармоники эквивалентной магнитной проводимости при взаимодействии основной гармоники МДС поля ПМ и одной из основных гармоник МДС обмотки, вращающейся в том же направлении.

7. Проведено сравнительное моделирование и многокритериальная оценка эффективности различных способов улучшения гармонического состава МДС ДЗО. Сравнение выполнено с применением метода конечно-элементного анализа на основе общей модели электрической машины с сохранением главных размеров и уровня

электромагнитных нагрузок. Установлено, что применение способа выполнения ДЗО из двух элементарных, уложенных в отдельных пазах, приводящего к уменьшению основной гармоники МДС обмотки, не являющейся рабочей, является наиболее рациональным. Данный способ демонстрирует наилучшие показатели по большинству исследуемых критериев: уменьшение пульсации электромагнитного момента на ~90% без насыщения стали и на ~75% с учетом насыщения; снижение низкочастотной составляющей радиальной силы как с насыщением стали, так и без - на ~85%; уменьшение пульсации магнитной индукции постоянных магнитов как с насыщением стали, так и без - на ~50%; снижение индуктивности на ~50%.

8. На основе проведенного гармонического анализа МДС, создаваемой ДЗО, выполненными из двух элементарных и уложенных в отдельных пазах с определенным пространственным сдвигом между обмотками, получены выражения для обмоточного коэффициента и относительной амплитуды гармоник МДС таких обмоток. Показано, что в отличие от классических ДЗО, в обмоточный коэффициент пространственных гармоник МДС ДЗО, выполненных из двух элементарных, входит дополнительный множитель, названный коэффициентом сдвига. Данный коэффициент показывает влияние величины угла сдвига между элементарными обмотками и их взаимного включения на величину обмоточного коэффициента гармоник МДС.

9. Сформированы научно-обоснованные рекомендации по применению способа выполнения ДЗО из двух элементарных, уложенных в отдельных пазах для наиболее распространенных ДЗО. Предложены варианты включения элементарных обмоток и выбор величины угла сдвига между обмотками. Отмечено, что в качестве рабочей гармоники МДС обмотки может быть выбрана любая из двух основных пространственных гармоник ДЗО.

10. На примере распространенных ДЗО с тремя фазными зонами с числом пазов на полюс и фазу $q = 1/2$ (1/4) и $q = 3/8$ (3/10) показано, что при использовании представленных рекомендаций, возможно полностью устранить одну из основных гармоник МДС обмотки, без уменьшения амплитуды другой основной гармоники. На примере распространенных ДЗО с шестью фазными зонами с числом пазов на полюс и фазу $q = 2/5$ (2/7) и $q = 4/11$ (4/13) показано, что использование представленных рекомендаций позволяет достичь снижения амплитуды одной основной гармоники МДС обмотки более чем на 80 % при уменьшении другой основной гармоники менее чем на 2 %.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Способы улучшения гармонического состава магнитного поля в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками / Д.Ю. Бабицкий, Д.М. Топорков, А.Г. Приступ, З.С. Темлякова // Электротехника. – 2021. - № 6. – С. 31-36.

2. Влияние температуры постоянных магнитов и конструкции магнитной системы ротора на внешнюю характеристику генератора с магнитоэлектрическим возбуждением, работающего на автономную нагрузку / Д.Ю. Бабицкий, Д.М. Топорков // Электротехника. – 2022. - № 5. – С. 34-39.

3. Об улучшении гармонического состава магнитодвижущей силы дробных зубцовых обмоток / Д.Ю. Бабицкий, А.Ф. Шевченко // Электротехника. – 2023. – № 5. - С. 29-33.

4. Пульсации момента в машинах с дробными зубцовыми обмотками и постоянными магнитами / Д.Ю. Бабицкий, Д.М. Топорков, Г.О. Гейнрих // Электротехника. – 2024. - № 3. – С. 20-27.

5. Исследование радиальных электромагнитных сил в машинах с дробными зубцовыми обмотками и постоянными магнитами / Бабицкий, Д.Ю. // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2026. – № 3 (72). – С. 5–19. – DOI 10.17212/1727-2769-2026-3-5-19.

Публикации в изданиях индексируемых наукометрическими базами Scopus / Web of Science:

6. Энергоэффективный тяговый электропривод переменного тока и исследование его модификации = Energy-efficient ac electric traction drive and study about its modification / Д. Ю. Бабицкий, Р. О. Никулин. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2022. – № 12/2. – С. 34–46.

7. Investigation and improvement of flux density harmonic content in electrical machines with fractional slot tooth concentrated windings / D. Y. Babitsky, D. M. Toporkov // International conference on electrotechnical complexes and systems (ICOECS 2019) : proc., Ufa, 22–25 Oct. 2019. – P. 86–89.

Публикации в материалах и трудах конференций:

8. Применение сдвига части обмотки статора для дробной зубцовой обмотки с числом пазов на полюс и фазу q=4/11 / Д. Ю. Бабицкий, А. С. Лобачева // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной Году науки и технологий в России. Новосибирск, 06–10.12.2021 г. Том Часть 5. – Новосибирск: НГТУ, 2021. – С. 60-64.

9. Выбор магнитных систем роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами с повышенными удельными характеристиками / Д.Ю. Бабицкий, Г.О. Гейнрих, А.Г. Приступ, А.Ф. Шевченко // Электротехника, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты (МКЭЭЭ-2022): Труды XIX международной конференции (27 сентября-1 октября 2022 г., Алушта). – С. 90-94.

10. Исследование пульсаций момента в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками и постоянными магнитами при гладком немагнитном зазоре / Д. Ю. Бабицкий, Г. О. Гейнрих // Наука. Технологии. Инновации: XVII Всеросс. научн. конф. молодых ученых: Сб. научн. тр., Новосибирск, 04–08.12.2023 г. – Новосибирск: НГТУ, 2024. – С. 49-53.

Патент на полезную модель РФ:

11. Патент на полезную модель № 215796 U1 Российская Федерация, МПК H02K 3/28, H02K 17/14. Обмотка электрической машины переменного тока: заявл. 19.07.2022: опубл. 28.12.2022 / Г.А. Шаншуров, Д.Ю. Бабицкий, Д.М. Топорков, Т.В. Честюнина; заяв. ФГБОУ ВО "Новосибирский государственный технический университет".

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Тел./факс: (383)346-08-57.
Формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.
Заказ № Р-05921 подписано в печать 06.11.2026 г.