На правах рукописи



Гейнрих Герман Олегович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ БЕСПАЗОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ДРОБНЫМИ 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: **Захаров Алексей Вадимович**, доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Инжиниринговый центр «Русэлпром» (г. Москва), подразделение «Электрические машины», руководитель направления расчетов;
Москалев Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омского государственного университета путей сообщения», (г. Омск), кафедра «Электрические машины и общая электротехника», доцент.

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 $13^{\underline{00}}$ 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

Благодаря появлению высокоэрцитивных магнитотвёрдых материалов, таких как *NdFeB* и *SmCo* и совершенствованию аппаратной базы управления, связанному с развитием микропроцессорной техники и силовой полупроводниковой электроники, синхронные магнитоэлектрические машины получили в кратчайшие сроки весомое развитие, позволившее им стать одним из самых широко представленных в различных отраслях классом электромеханических преобразователей. Мнение многих специалистов сходится в том, что синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) на сегодняшний день – это наиболее перспективное решение в плане выбора электромеханического преобразователя в диапазоне малых и средних мощностей.

Преимущества синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов (СМПМ) ранее были отмечены многими авторами и не вызывают сомнений. Двигатели такого типа конструктивно просты и надёжны. Они не имеют трущихся контактов, не требуют затрат энергии на возбуждение, обладают большой перегрузочной способностью, высоким быстродействием в переходных процессах и простой конструкцией.

Стоит отметить, что сферы эксплуатации СМПМ не ограничиваются только общепромышленным назначением – существует множество специальных электрических машин для более узкоспециализированных применений, которые могут значительно отходить от конструктивной концепции классических электрических машин. И для эффективной реализации огромного потенциала применения постоянных магнитов в электрических машинах, от случая к случаю, необходимо отходить от традиционных, имеющих высокую степень разработанности типов электрических машин в сторону вышеупомянутых специальных типов. Здесь можно упомянуть и машины с внешним ротором, и машины с аксиальным типом возбуждения, и линейные двигатели и т.д. Один из типов специальных СМПМ, о которых пойдёт речь в данной работе – синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов и беспазовой конструкцией статора.

История появления беспазовых электрических машин берёт начало с 1970-х годов прошлого столетия, в этот период в автоматизации развитие получили двигатели постоянного тока без зубцовой зоны на якоре с полым ротором. До появления на рынке относительно недорогих постоянных магнитов из редкоземельных элементов такой тип электрических машин не получал значительного развития. Однако, анализ особенностей характеристик высококоэрцитивных магнитов (высокие значения коэрцитивных сил по намагниченности и индукции, значение магнитной проницаемости, близкое к значению магнитной проницаемости воздуха) и сегодняшних требований к электрическим машинам показывает, что синхронные машины с постоянными магнитами на роторе и статором без зубцовой зоны обладают рядом преимуществ, не присущих машинам с пазовыми статорами, и видятся перспективным недостаточно изученным направлением в электромеханике. Исследование особенностей данного класса электрических машин с целью сокращения времени их проектирования при

сохранении достоверности результатов расчётов позволит научно обосновать области их эффективного применения и снизить уровень пульсаций электромагнитного момента.

Степень разработанности

На сегодняшний день электрические машины с беспазовой конструкцией статора с магнитоэлектрическим возбуждением нельзя назвать хорошо исследованным направлением электромеханики. Тем не менее, отечественные учёные, такие как В.А. Балагуров, А.А. Афанасьев, А.Н. Ледовский, Д.А. Бут, Ю.А. Бахвалов внесли значительный вклад в теорию разработки и применения беспазовых электрических машин. В данных работах авторами отмечаются преимущества таких электрических машин, как высокое быстродействие, пониженный уровень пульсаций электромагнитного момента, линейность механических и жёсткость внешних характеристик. Однако, на момент публикации, беспазовые электрические машины так и не получили широкого распространения. Недостаточная степень реализации электрических машин данного класса в различных отраслях объясняется ограничениями расчётно-теоретического характера, ввиду значительных отличий структуры магнитного поля данного класса электрических машин от поля машин классической компоновки. Эти различия влекут недостаточную методическую проработку и очень ограниченное количество математических моделей электрических машин данного класса, из-за чего становится сложным проектирование таких машин и применение при проектировании тех или иных технических решений.

В существующих на сегодняшний день образцах беспазовых электрических машин принято использовать классические обмотки с числом $q>1$ (число пазов на полюс и фазу). Однако, в работе, после обоснования, автором предлагается использовать для беспазовых электрических машин обмотки с $q<1$. Существенный вклад в развитие класса электрических машин, выполненных на основе дробных обмоток с $q<1$, сделал Шевченко А. Ф. В его работах приведены методы построения и особенности устройства симметричных многофазных обмоток с $q<1$, показан принцип действия электрических машин с такими обмотками, рассмотрена возможность их применения. Им было показано, что дробные зубцовые обмотки создают магнитодвижущую силу, в гармоническом составе которой можно выделить две основные, имеющие высокую амплитуду, близкую полюсность и вращающиеся в противоположных направлениях. Таким образом, электрическая машина может быть спроектирована для работы на любой из этих двух основных гармоник магнитодвижущей силы. Однако, имеющиеся на сегодняшний день выражения для расчёта магнитодвижущей силы таких обмоток справедливы лишь для машин с пазовой конструкцией статора.

Объектом исследования являются синхронные электрические машины с беспазовой конструкцией статора, возбуждением от постоянных магнитов и дробными катушечными обмотками.

Предмет исследования: процессы формирования и методы аналитического расчёта электромагнитного момента беспазовых синхронных электрических машин с постоянными магнитами и дробными катушечными обмотками.

Цель работы: Разработка аналитического метода определения электромагнитного момента беспазовых синхронных машин с постоянными магнитами и дробными катушечными обмотками, обеспечивающего сокращение времени проектирования при сохранении достоверности результатов расчетов.

Для достижения обозначенной цели работы автором были поставлены следующие **задачи:**

1. Выполнить сравнение электрических машин с пазовой и беспазовой конструкцией статора, на основании которого выявить области наиболее эффективного применения для беспазовых синхронных электрических машин.
2. Провести гармонический анализ магнитодвижущей силы дробных катушечных обмоток в беспазовых синхронных машинах с постоянными магнитами, оценить влияние геометрических параметров катушек на амплитуду рабочих гармоник МДС и выявить условия возникновения пульсаций электромагнитного момента от конфигурации обмотки.
3. Разработать аналитический метод расчета электромагнитного момента беспазовых электрических машин с постоянными магнитами и дробными катушечными обмотками на основе созданной модели распределения магнитного поля в воздушном зазоре, с последующей верификацией полученных результатов сравнением с численным моделированием методом конечных элементов.
4. Провести экспериментальные исследования макетного образца беспазовой синхронной машины с целью верификации разработанного аналитического метода расчёта электромагнитного момента и подтверждения достоверности теоретических результатов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Получено аналитическое выражение для определения магнитодвижущей силы обмотки беспазовой синхронной электрической машины с постоянными магнитами, отличающееся введением коэффициента формы МДС, позволяющего учитывать пространственное распределение проводников в немагнитном зазоре при варьировании геометрических параметров катушек. На его основе установлена зависимость амплитуды рабочих гармоник магнитодвижущей силы от конфигурации катушек обмотки статора.
2. Разработан метод аналитического определения электромагнитного момента беспазовых синхронных электрических машин с постоянными магнитами, отличающийся использованием модели магнитного поля в зазоре, полученной в аналитическом виде на основе функций Грина. Достоверность расчёта электромагнитного момента разработанным методом подтверждена численным моделированием методом конечных элементов.
3. Выявлены закономерности формирования пульсаций электромагнитного момента в беспазовых синхронных электрических машинах с постоянными магнитами. Показано, что взаимное согласование геометрических параметров катушек обмотки и ширины полюсов постоянных магнитов позволяет снизить уровень пульсаций момента до значений менее 1 %.

Теоретическая значимость:

1. На основе полученного выражения для расчёта магнитодвижущей силы беспазовых синхронных электрических машин с постоянными магнитами и

дробными катушечными обмотками (q<1) установлены закономерности, определяющие зависимость их гармонического состава от пространственного распределения проводников в немагнитном зазоре.

2. Разработан метод аналитического расчёта беспазовых синхронных электрических машин, позволяющий существенно сократить временные и вычислительные затраты на определение распределения магнитного поля и электромагнитного момента на этапе проектирования при сохранении достоверности результатов расчётов.

3. Доказано влияние геометрических параметров катушек обмотки статора на гармонический состав и уровень пульсаций электромагнитного момента беспазовых синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

Практическая значимость:

1. Сформулированы технические рекомендации по выбору конфигурации дробно-катушечной обмотки и геометрии магнитной системы, применение которых позволяет минимизировать пульсации электромагнитного момента, что способствует повышению плавности работы электромеханических преобразователей энергии в составе электротехнических комплексов.

2. На основе данных натурных испытаний изготовленного прототипа беспазового электромеханического преобразователя энергии подтверждена достоверность разработанного аналитического метода расчета электромагнитного момента. Это подтверждает возможность его использования при предварительном анализе характеристик аналогичных устройств на этапе проектирования.

Методы исследования

Результаты работы получены с использованием аналитических методов теории электрических машин и метода гармонического анализа. Также были применены методы численного расчета магнитного поля с использованием программного обеспечения, реализующего метод конечно-элементного анализа, физико-математические методы полевого расчёта, а также метод натурного эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитический метод определения электромагнитного момента беспазовых электрических машин с постоянными магнитами, базирующийся на оригинальном подходе к описанию магнитного поля в воздушном зазоре. Данная модель основывается на функции Грина для кольцевого зазора с нулевыми граничными условиями и позволяет вычислить величину компонент индукции и электромагнитного момента с подтвержденной достоверностью без привлечения ресурсоемких численных методов.

2. Аналитическое выражение для магнитодвижущей силы (МДС) катушки, фазной зоны и трёхфазной обмотки в беспазовых машинах, включающее введённый коэффициент формы МДС, позволяющее оценить влияние конфигурации катушек на амплитуды рабочих и высших гармоник, а также установить зависимость этих величин от вариации пространственного распределения проводников по немагнитному зазору.

3. Закономерности формирования пульсаций электромагнитного момента в беспазовых синхронных электрических машинах с постоянными магнитами, обусловленные отсутствием зубцовой составляющей. Установлено, что взаимное

согласование геометрических параметров катушек обмотки статора и ширины полюсов постоянных магнитов ротора обеспечивает снижение общего уровня пульсаций момента от высших пространственных гармоник до значений менее 1 %.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты, полученные в ходе выполнения научно-квалификационной работы, определяются обоснованностью принятых допущений, использованием устоявшихся в области электрических машин методов расчета и взаимодополняющих методов численного моделирования.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах кафедры электромеханики Новосибирского государственного технического университета, а также всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск) в 2022, 2023, 2024, 2025 гг.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключался в решении поставленных задач, обосновании теоретических и экспериментальных методов, разработке математических моделей в аналитическом виде, проведении численного моделирования и экспериментальных исследований макетного образца, а также в обобщении и анализе полученных результатов.

Публикации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 8 научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук – 5, в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций – 3 .

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют научной специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» в части пунктов 1, 2.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 83 наименований. Общий объем работы составляет 132 страницы, в том числе 14 таблиц и 59 рисунков, 1 приложение.

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.

Первая глава посвящена общей характеристике электрических машин с беспазовой конструкцией статора и возбуждением от постоянных магнитов (БЭМПМ). Рассмотрены типовые конструкции таких машин, способы крепления обмотки к ярму статора (приклеивание, использование немагнитных каркасов, заливочные компаунды, спиральная ламинация и др.), а также технологии производства.

Для БЭМПМ характерно многообразие конструктивных исполнений: классическая компоновка (рисунок 1), машины с внешним ротором, аксиально-потоковые (дискообразные) и др. При этом структура ротора в беспазовых и пазовых СМПМ практически идентична, а магнитопровод статора состоит из кольцевого ярма без зубцовой зоны. Обмотка размещается непосредственно в воздушном зазоре или на его поверхности.

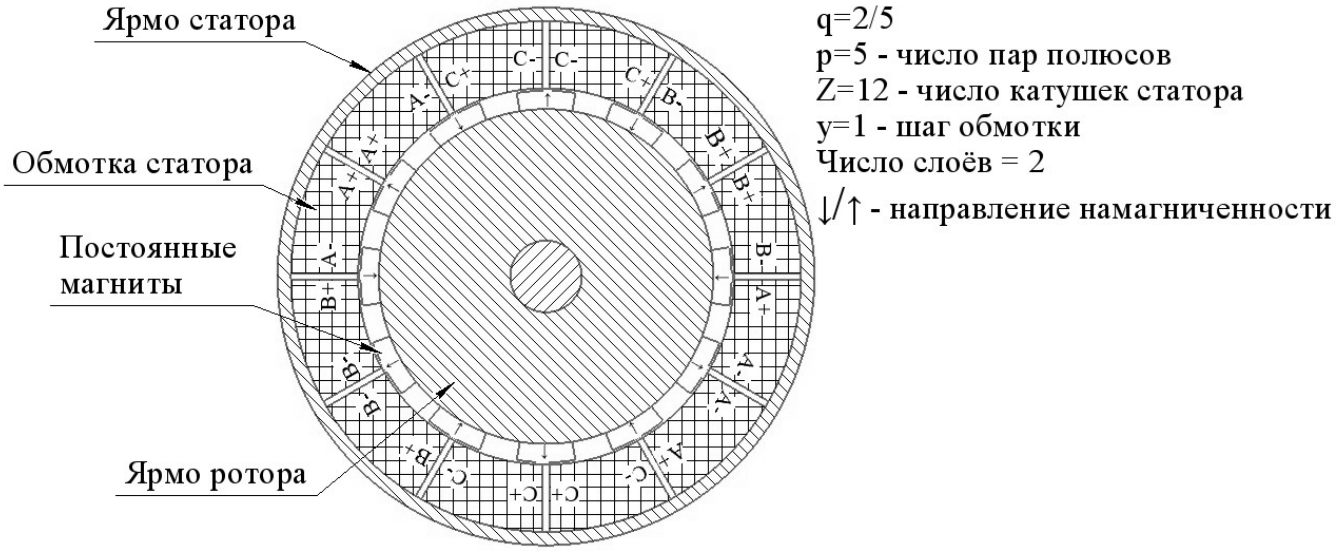


Рисунок 1 – Пример конструкции беспазовой электрической машины с постоянными магнитами

Обоснована перспективность применения в БЭМПМ дробных катушечных обмоток с $q < 1$, что упрощает технологию изготовления, повышает удельный момент, уменьшает осевой габарит, расход меди и электрические потери.

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

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

Дробные катушечные обмотки с $q<1$ формируются из нескольких одинаковых фазных зон, число которых кратно числу фаз m. В трёхфазных машинах при нечётном d количество фазных зон равно 6 ($m_з = 2m$), при чётном d – 3 ($m_з = m$). Каждая фазная зона состоит из c последовательно соединённых катушек, причём каждая катушка охватывает участок беспазовой конструкции, соответствующий одному зубцу в аналогичной пазовой конструкции.

Выделены основные преимущества БЭМПМ по сравнению с пазовыми аналогами:

1) отсутствие потерь в зубцовой зоне статора;
2) исключение реактивного момента и зубцовых пульсаций, что особенно важно для прецизионных приводов;
3) отсутствие вихревых токов в массиве магнитов;
4) возможность повышения линейной нагрузки за счёт высвобождения свободного пространства под обмотку;

5) низкая собственная индуктивность обмотки и индуктивность рассеяния, малая электромагнитная постоянная времени.

Проведено сравнение моделей электродвигателей пазовой и беспазовой конструкции в одинаковых габаритах при равном суммарном уровне потерь.

Полученные зависимости (рисунки 2–3) показывают, что при фиксированном тепловом состоянии БЭМПМ обеспечивают сопоставимый или более высокий момент и КПД на высоких частотах вращения за счёт меньшего роста потерь в магнитопроводе. Это делает такие машины перспективными для высокоскоростных и прецизионных приводов, беспилотных летательных аппаратов, робототехники и других систем специального назначения.

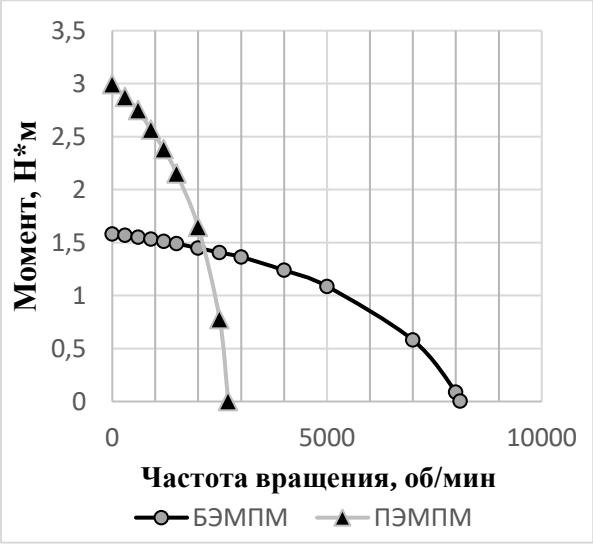


Рисунок 2 – Зависимость выходного крутящего момента от частоты вращения

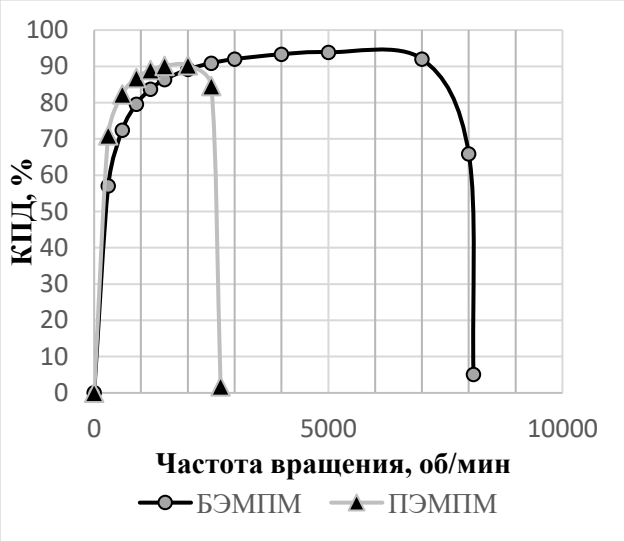


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента полезного действия от частоты вращения

Во второй главе приведены результаты исследования особенностей магнитодвижущих сил (МДС) дробных катушечных обмоток ($q < 1$) в беспазовых машинах. Приняты допущения о гладком воздушном зазоре и бесконечной магнитной проницаемости ярма. Из-за расположения проводников в зазоре (а не в пазах) кривая МДС отдельной катушки в общем случае имеет трапецеидальную форму (рисунок 4), в отличие от прямоугольной в классических машинах.

МДС одной катушки представлена выражением (1). Амплитуда ν-й гармоники зависит от соотношения T1/T0 (внутренний шаг катушки к ширине катушки).

$$F_{kvm} = \frac{4FT}{\pi^2 \nu^2 \cdot (T_0 - T_1)} \cdot \sin\left[\frac{\pi\nu \cdot (T_0 - T_1)}{2T}\right] \cdot \sin\left[\frac{\pi\nu \cdot (T_0 + T_1)}{2T}\right], \qquad (1)$$

здесь $F = i_к w_к$, где $i_к$ – мгновенное значение силы тока в катушке, а $w_к$ – число витков; ν – номер гармоники.

Рассмотрены частные случаи:

1) $T_1 = 0$ — треугольная форма МДС;

2) $T_1 = T_0$ — прямоугольная форма со стороной $F = i_к w_к$ (сводится к классическому выражению с коэффициентом укорочения $k_у$ коэффициентом распределения $k_р$);

3) $T_1 = nT_0$ — общий случай с трапецеидальной формой.

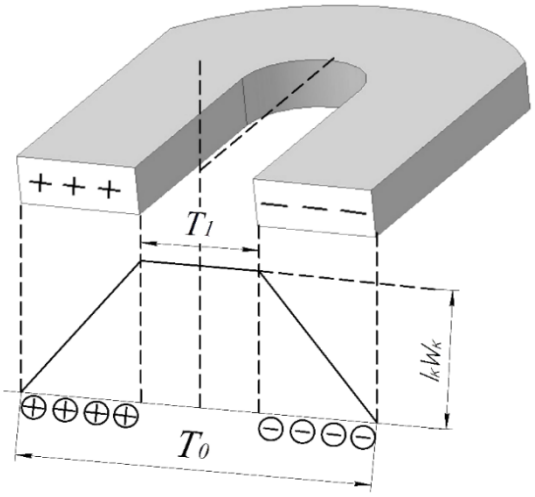


Рисунок 4 – Поперечный разрез катушки и созданная ею МДС

Введён коэффициент формы МДС $k_{фМДС}$, учитывающий трапецеидальность кривой (2).

$$k_{фvМДС} = \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi v \cdot (T_0 - T_1)}{2T} \right)}{\frac{\pi v \cdot (T_0 - T_1)}{2T}} \right] \tag{2}$$

Получено аналитическое выражение для МДС ν-й гармоники всей обмотки (3), включающее коэффициенты формы МДС, укорочения и распределения.

$$F_v = \frac{m_з}{2} F_{зvm} \cos\left(\omega t \mp v\alpha_0\right) = F_{vm} \cos\left(\omega t \mp v\alpha_0\right), \tag{3}$$

где амплитуда МДС v-ой гармоники:

$$F_{vm} = \frac{m_з}{2} F_{зvm} = \frac{\sqrt{2} \cdot m_з}{v\pi} Iw_k ck_{уv} k_{рv} k_{фv} = \frac{\sqrt{2} \cdot m_з}{v\pi} Iwk_{об} \tag{4}$$

С помощью этих выражений рассчитан гармонический состав МДС для типовых схем $q = 2/5$ и $q = 3/8$ (табл. 1–2).

Диаграммы (рисунки 5–6) показывают влияние T_1/T_0 на амплитуды рабочих гармоник. Максимальные значения МДС достигаются при форме, близкой к прямоугольной (минимальное T_1/T_0, сосредоточенная укладка).

Установлено, что в беспазовых машинах полностью отсутствуют зубцовые пульсации момента благодаря отсутствию зубцовой зоны на статоре, что делает их особенно перспективными для прецизионных приводов.

Однако пульсации момента, обусловленные взаимодействием высших гармоник МДС ротора и статора, очевидно, зависят от формы кривой МДС. Как было сказано ранее, форма кривой МДС определяется коэффициентом формы МДС $k_{\text{фМДС}}$.

Таблица 1 – Гармонический состав МДС для обмотки q = 2/5

ν	q=2/5									
	$T_1=0$		$T_1=0.3T_0$		$T_1=0.5T_0$		$T_1=0.8T_0$		$T_1=T_0$	
	$k_{\text{об}}$	F	$k_{\text{об}}$	F	$k_{\text{об}}$	F	$k_{\text{об}}$	F	$k_{\text{об}}$	F
1	0,034	0,182	0,044	0,236	0,05	0,273	0,06	0,326	0,067	0,362
5	0,547	0,591	0,701	0,757	0,789	0,852	0,89	0,961	0,933	1,008
7	0,663	0,512	0,837	0,646	0,915	0,706	0,958	0,739	0,933	0,72
11	0,177	0,087	0,207	0,102	0,197	0,097	0,133	0,065	0,067	0,033
13	-0,15	0,062	-0,162	0,067	-0,127	0,053	-0,02	0,008	0,067	0,028
17	-0,273	0,087	-0,153	0,048	0,152	0,048	0,71	0,226	0,933	0,296
19	-0,144	0,041	0,05	0,014	0,409	0,116	0,901	0,256	0,933	0,265
23	-0,002	0,0003	0,074	0,017	0,168	0,04	0,185	0,043	0,067	0,016
25	0,001	0,0003	-0,076	0,016	-0,155	0,033	-0,092	0,02	0,067	0,014
29	0,094	0,018	-0,165	0,031	-0,268	0,05	0,458	0,085	0,933	0,174
31	0,15	0,026	-0,085	0,015	-0,083	0,015	0,736	0,128	0,933	0,163

Таблица 2 – Гармонический состав МДС для обмотки q = 3/8

ν	q=3/8									
	$T_1=0$		$T_1=0.3T_0$		$T_1=0.5T_0$		$T_1=0.8T_0$		$T_1=T_0$	
	$k_{\text{об}}$	F	$k_{\text{об}}$	F	$k_{\text{об}}$	F	$k_{\text{об}}$	F	$k_{\text{об}}$	F
1	-0,031	0,124	-0,04	0,161	-0,046	0,186	-0,055	0,222	-0,061	0,246
2	0,073	0,148	0,094	0,191	0,108	0,219	0,128	0,259	0,14	0,283
4	0,568	0,575	0,727	0,736	0,814	0,825	0,91	0,922	0,945	0,957
5	0,645	0,523	0,817	0,662	0,898	0,728	0,955	0,774	0,945	0,766
7	0,157	0,091	0,192	0,111	0,197	0,114	0,174	0,101	0,14	0,081
8	-0,123	0,062	-0,146	0,074	-0,141	0,072	-0,103	0,052	-0,061	0,031
10	-0,099	0,04	-0,105	0,042	-0,078	0,032	0	0	0,061	0,025
11	0,1	0,037	0,095	0,035	0,048	0,018	-0,066	0,024	-0,14	0,052
13	0,248	0,077	0,115	0,036	-0,198	0,062	-0,75	0,234	-0,945	0,295
14	0,162	0,047	-0,019	0,006	-0,369	0,107	-0,877	0,254	-0,945	0,274
16	0,009	0,0023	-0,048	0,012	-0,133	0,034	-0,196	0,05	-0,14	0,035
17	-0,002	0,004	0,049	0,012	0,115	0,027	0,135	0,032	0,061	0,014
19	-0,002	0,0003	0,051	0,011	0,103	0,022	0,051	0,011	-0,061	0,013
20	0,007	0,002	-0,056	0,011	-0,106	0,022	0	0	0,14	0,028
22	0,103	0,019	-0,15	0,028	-0,235	0,043	0,51	0,094	0,945	0,174
23	0,14	0,025	-0,097	0,017	-0,112	0,02	0,696	0,123	0,945	0,166

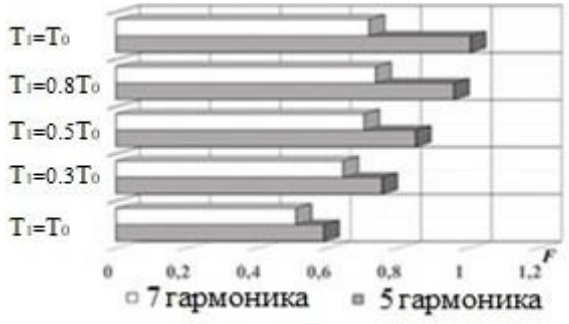


Рисунок 5 – Влияние величины T_1 на амплитуду МДС основных гармоник обмотки с q= 2/5

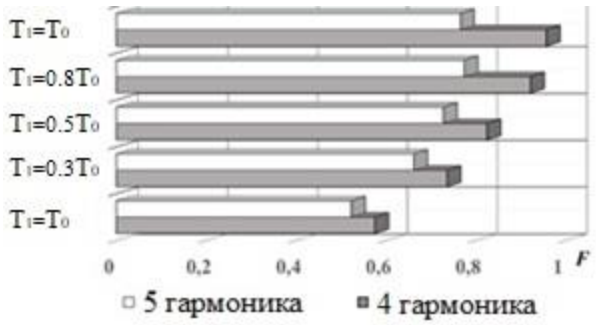


Рисунок 6 – Влияние величины T_1 на амплитуду МДС основных гармоник обмотки с q= 3/8

В работе также исследовано влияние коэффициента $k_{\text{фМДС}}$ на уровень пульсаций электромагнитного момента. На рисунке 7 показано на примере взаимное согласование значений коэффициента формы МДС (определяющего геометрию катушек) и ширины постоянных магнитов ротора, позволяющего добиться минимального уровня пульсаций в пределах 1%.

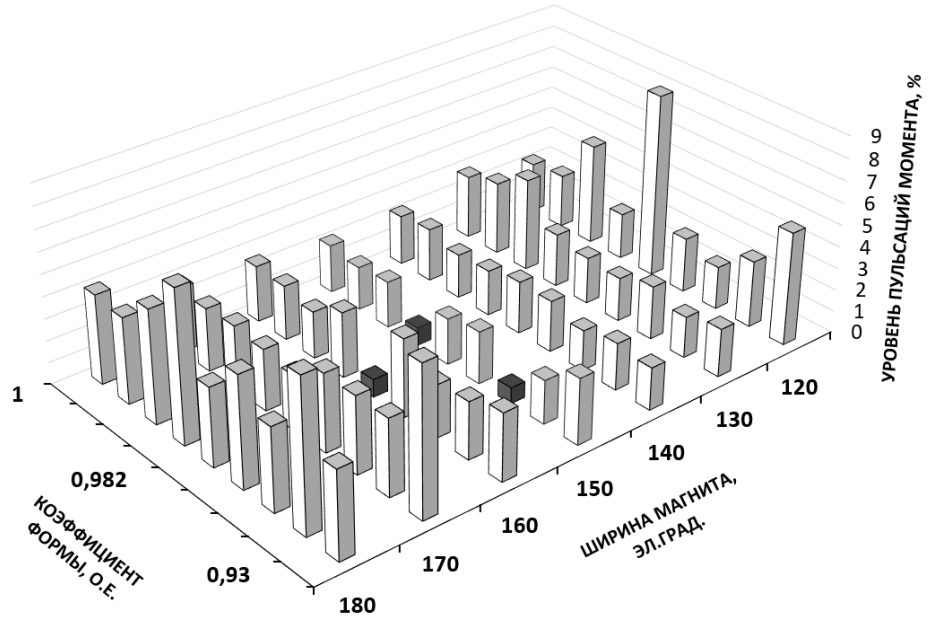


Рисунок 7 – Зависимость общего уровня пульсаций момента от ширины магнита и коэффициента формы в БЭМПМ

Таким образом, выбор распределения проводников определяется назначением машины: сосредоточенная укладка — для максимального момента и удельной мощности, рассредоточенная — для минимизации пульсаций момента в высокоточных системах.

В третьей главе разработан аналитический метод расчёта электромагнитного момента беспазовых синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов и дробными катушечными обмотками (q < 1).

Для реализации метода в качестве математического базиса предложена аналитическая модель магнитного поля в беспазовом синхронном двигателе с возбуждением от постоянных магнитов и дробной катушечной обмоткой (q < 1).

Модель основывается на функции Грина для двумерного воздушного зазора, что позволяет учитывать геометрию источников: радиальные постоянные магниты ротора и распределённые катушечные обмотки статора.

Магнитное поле описывается через векторный потенциал *A*, удовлетворяющий уравнению Пуассона в двумерной постановке:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial A_z}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 A_z}{\partial \varphi^2}=-\mu_0 j_z(r,\varphi). \quad (5)$$

здесь j_z – плотность тока в обмотке (для ротора – эквивалентная намагниченность магнитов).

Граничные условия для уравнения (5) получаются из приближения бесконечной магнитной проницаемости ярем ротора и статора:

$$B_\varphi\big|_{r=r_1,r_2}=-\frac{\partial A}{\partial r}\bigg|_{r=r_1,r_2}=0. \quad (6)$$

где r_1, r_2 – радиусы поверхностей соответственно ротора и статора (рисунок 8).

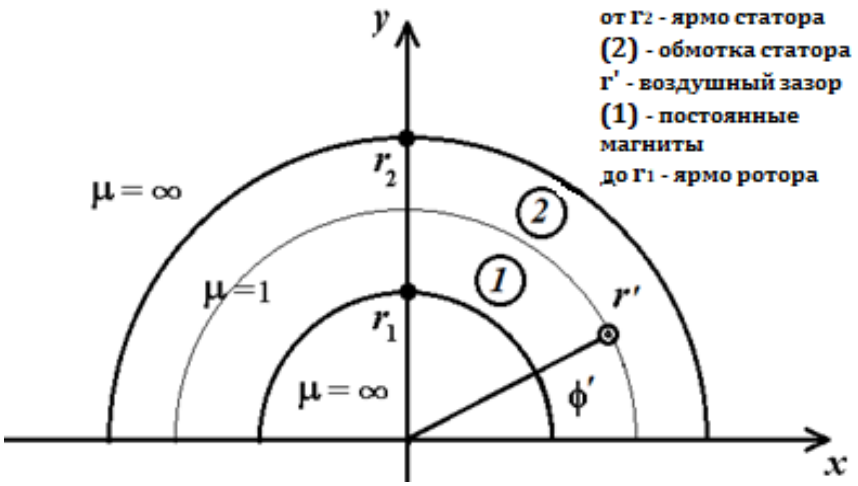


Рисунок 8 – Область расчета магнитного поля (верхняя половина)

Решение уравнения (5) представлено в виде суммы вкладов от отдельных источников:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial G}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 G}{\partial \varphi^2}=\frac{1}{r}\delta(r-r')\delta(\varphi-\varphi') \quad (7)$$

здесь *G* — функция Грина для кольцевого зазора, *δ(x)* дельта-функция Дирака, то есть обобщённая функция.

В нашем случае, дельта-функция представляет собой точечный источник магнитного поля в точке с координатами (*r′*, *φ′*).

Решение исходного уравнения (5) через функцию Грина выражается следующим образом:

$$A(r,\varphi)=-\mu_0\int_0^{2\pi}\int_{r_1}^{r_2} G(r,\varphi,r',\varphi')\, j(r',\varphi')\, r'dr'd\varphi' \quad (8)$$

Упуская дальнейшие преобразования, представленные в полном объёме в тексте диссертации, приведём решение уравнения с помощью функции Грина (9).

$$G^{(1,2)}(r,\varphi,r',\varphi') = \frac{1}{2\pi}\ln\left(\frac{r}{r'}\right)\theta(r-r') - \\ -\frac{1}{2\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\frac{\cos\left(n(\varphi-\varphi')\right)}{r_2^{2n}-r_1^{2n}}\left(r'^n+\frac{r_{2,1}^{2n}}{r'^n}\right)\left(r^n+\frac{r_{1,2}^{2n}}{r^n}\right). \quad (9)$$

Искомое магнитное поле удобно представить в виде суммы полей, создаваемых отдельными источниками, которыми в нашем случае являются постоянные магниты и катушки с током (рисунок 9 и рисунок 10).

Получены выражения для вычисления векторного магнитного потенциала для поля магнита ротора и для поля катушки статора – (10) и (11)

$$A_{rt}(r,\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty}\tilde{C}_n\left(r^n+\frac{r_2^{2n}}{r^n}\right)\sin(n\varphi), \quad (10)$$

где

$$\tilde{C}_n = \frac{\mu_0}{\pi}\frac{M_0}{n}\frac{r_1^{n+1}}{r_2^{2n}-r_1^{2n}}\left(\sin(n\Delta\varphi_M)\cos(\Delta\varphi_M)P_n+\left(\left(\frac{r_M}{r_1}\right)^{n+1}+\left(\frac{r_1}{r_M}\right)^{n-1}-2\right)Q_n\right)$$

$$Q_n = \frac{\Delta\varphi_M}{2}\left(\operatorname{sinc}\left((n-1)\Delta\varphi_M\right)-\operatorname{sinc}\left((n+1)\Delta\varphi_M\right)\right).$$

$$P_n = \frac{1}{n+1}\left(\left(\frac{r_M}{r_1}\right)^{n+1}-1\right)+\frac{1}{n-1}\left(1-\left(\frac{r_1}{r_M}\right)^{n-1}\right) \quad (n\neq 1).$$

$$A_{st}(r,\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty}\tilde{C}_n\left(r^n+\frac{r_1^{2n}}{r^n}\right)\sin(n\varphi) \quad . \quad (11)$$

в котором, $\tilde{C}_n = \frac{\mu_0}{\pi}\frac{2j_0}{n^2}\frac{\sin(n\varphi_C)\sin\left(n\frac{\Delta\varphi_C}{2}\right)}{r_2^{2n}-r_1^{2n}}\left(\frac{r_2^{n+2}-r_C^{n+2}}{n+2}+\frac{r_2^{2n}}{n-2}\left(\frac{1}{r_C^{n-2}}-\frac{1}{r_2^{n-2}}\right)\right)$ $(n\neq 2)$.

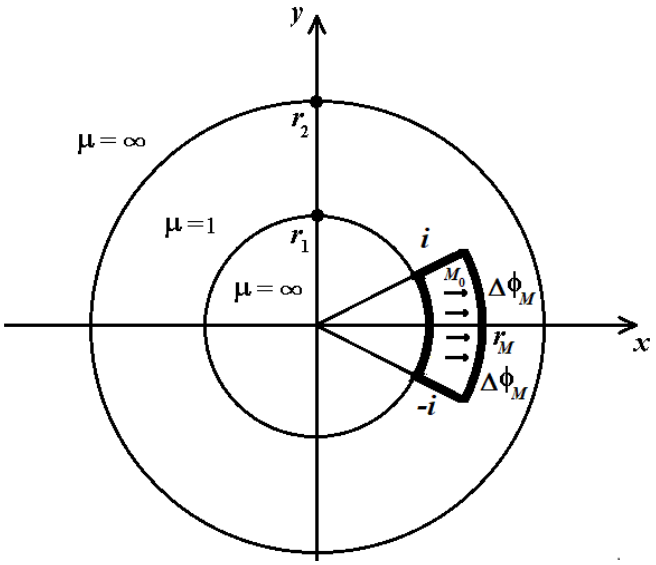


Рисунок 9 – Расчет магнитного поля в немагнитном зазоре для магнита

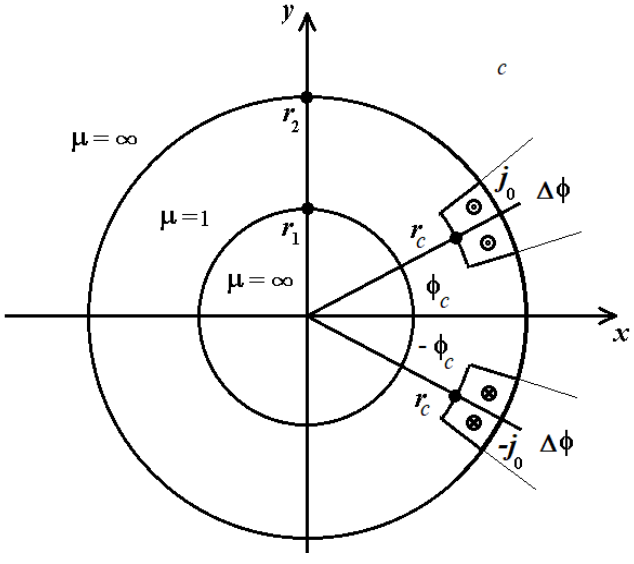


Рисунок 10 – Расчет магнитного поля в немагнитном зазоре для катушки

Применён принцип суперпозиции для расчета суммарного магнитного поля, создаваемого набором постоянных магнитов, расположенных на роторе, и катушек, размещенных на статоре. Вклад каждого магнита и каждой катушки в общее поле является независимым, и результирующее поле может быть найдено простым суммированием. Этот принцип позволяет рассматривать вклад каждого источника отдельно и потом просто сложить их для нахождения общего магнитного поля.

$$A(r,\varphi)=\sum_{k=1}^{N}A^{(k)}(r,\varphi) \qquad (12)$$

,

где A – суммарный векторный потенциал, A^k – векторный потенциал, создаваемый k-м источником (магнитом или катушкой).

Магнитные поля, создаваемые магнитами, расположенными на роторе и катушками, расположенными на статоре, рассчитаем отдельно. В нашем случае $A^{(k)}(r,\varphi)$ можно представить в следующем виде:

$$A^{(k)}(r,\varphi)=\beta_k A^{(0)}(r,\varphi-\alpha_k). \qquad (13)$$

где $A^{(0)}(r,\varphi)$ - потенциал поля, создаваемого одним симметричным источником (магнитом или катушкой), α_k - угол, на котором находится центр источника, β_k - коэффициент, характеризующий интенсивность источника (намагниченность магнита или силу тока в катушке). В результате получим явное выражение для векторного потенциала суммарного магнитного поля в воздушном зазоре:

$$A(r,\varphi)=\sum_{k=1}^{N}\beta_k\sum_{n=1}^{\infty}\tilde{C}_n\left(r^n+\frac{r_{1,2}^{2n}}{r^n}\right)\sin\left(n(\varphi-\alpha_k)\right)=\sum_{n=1}^{\infty}\tilde{C}_n\left(r^n+\frac{r_{1,2}^{2n}}{r^n}\right)\sum_{k=1}^{N}\beta_k\sin\left(n(\varphi-\alpha_k)\right) \qquad (14)$$

.

Имея рассчитанный векторный потенциал суммарного магнитного поля в воздушном зазоре, легко можно перейти к индукции магнитного поля через радиальную B_r и тангенциальную B_φ компоненты:

$$B_r=\frac{1}{r}\frac{\partial A}{\partial\varphi};\quad B_\varphi=-\frac{\partial A}{\partial r}. \qquad (15)$$

Верификация модели выполнена сравнением с конечно-элементным моделированием в FEMM. Максимальное расхождение между аналитическим и численным решением составляет не более 7% для радиальной компоненты поля и 13% для тангенциальной. Разница амплитуд основной гармоники не превышает 0.4%.

Таким образом, предложенный аналитический метод расчёта обеспечивает высокую точность и практическую применимость для поля в беспазовых синхронных машинах, являясь эффективной альтернативой более длительным численным методам.

На основе полученных выражений для векторного магнитного потенциала и компонент индукции, с использованием тензора напряжений Максвелла, выведено компактное аналитическое выражение для электромагнитного момента.

Тангенциальная компонента силы, приложенная к элементу dS поверхности, определяется выражением:

$$dF_\varphi=\frac{1}{\mu_0}B_\varphi B_r dS \qquad (16)$$

.

в котором B_φ и B_r – это, соответственно, тангенциальная и радиальная компоненты индукции магнитного поля.

Выражение для момента этой силы относительно оси двигателя представлено ниже:

$$dM = rdF_\varphi = \frac{r}{\mu_0} B_\varphi B_r dS = -\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial A}{\partial r}\frac{\partial A}{\partial \varphi} rLd\varphi \quad (17)$$

где L – длина двигателя, A – продольная компонента векторного потенциала.

Векторный потенциал магнитного поля в воздушном зазоре можно представить, как суперпозицию потенциалов, создаваемых магнитами ротора и токами в обмотке статора

$$A(r,\varphi) = A_{rt}(r,\varphi) + A_{st}(r,\varphi). \quad (18)$$

Очевидно, что по отдельности поля ротора и статора момента не создают, поэтому в произведении производных от векторных потенциалов, входящем в выражение (16), можно оставить только перекрестные слагаемые.

$$dM = -\frac{1}{\mu_0}\left(\frac{\partial A_{st}}{\partial r}\frac{\partial A_{rt}}{\partial \varphi} + \frac{\partial A_{rt}}{\partial r}\frac{\partial A_{st}}{\partial \varphi}\right) rLd\varphi. \quad (19)$$

Ранее было показано, как получаются векторные потенциалы магнитного поля ротора и статора. После подстановки выражений для векторных потенциалов и интегрирования по углу, окончательное выражение для момента можно представить в следующем виде:

$$M = L\frac{2\pi}{\mu_0}\sum_{n=1}^{\infty} n^2 \left(\tilde{C}s_n^S \tilde{C}r_n^C - \tilde{C}s_n^C \tilde{C}r_n^S\right)\left(r_2^{2n} - r_1^{2n}\right). \quad (20)$$

Верификация модели выполнена сравнением с результатами конечно-элементного моделирования в FEMM. Результат можно оценить по характеристикам на рисунке 11.

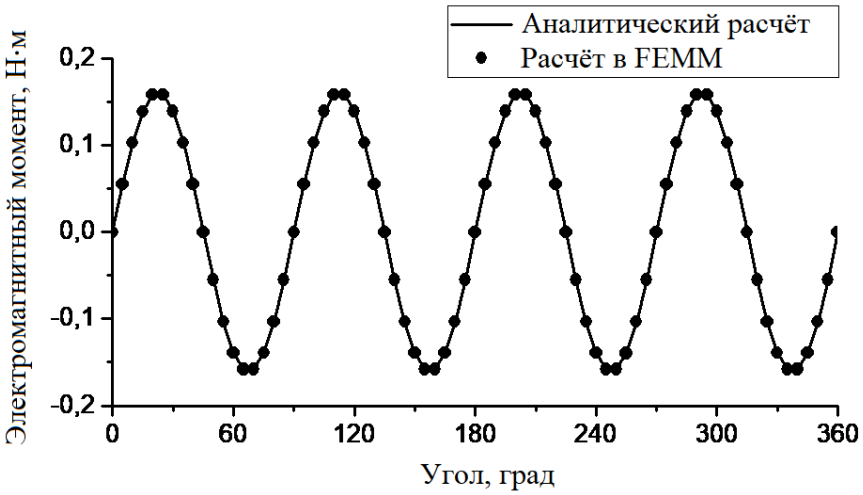


Рисунок 11 – Сравнение угловых характеристик, рассчитанных аналитическим методом и в FEMM

На рисунке 11 приведено сравнение угловых характеристик, полученных разными методами. Чёрной сплошной линией обозначен электромагнитный момент, рассчитанный с помощью предложенного аналитического метода, а чёрными круглыми маркерами обозначен электромагнитный момент, посчитанный при помощи FEMM. Максимальное расхождение между аналитическим и численным расчётом момента составляет менее 0,4 %, что подтверждает высокую точность предложенного подхода.

Следует заметить, что полученные результаты справедливы для электрических машин с любым значением дробности q (1/2, 2/5, 3/8 и т.д.).

В четвёртой главе представлен макетный образец беспазового синхронного электродвигателя, геометрическими размерами и параметрами имитирующий конструкцию модели электродвигателя, рассчитанной ранее предлагаемым аналитическим методом (рисунок 12).

Для верификации результатов аналитического расчёта были проведены следующие натурные эксперименты:

1) двигательный – питание обмоток постоянным током с измерением статического электромагнитного момента;
2) генераторный (холостой ход) – измерение линейной ЭДС при различных частотах вращения.

Экспериментально получена зависимость электромагнитного момента от тока в обмотке статора (рисунок 13). Максимальное расхождение с расчётом по аналитической модели составило менее 5 % в области номинальных токов, а с результатами конечно-элементного моделирования в FEMM — менее 3 %.



Рисунок 12 – Макетный образец электродвигателя в сборе

Снята зависимость линейной ЭДС от частоты вращения в генераторном режиме. Расхождение с результатами численного моделирования в Ansys Motor-CAD не превысило 4,5 %, что находится в пределах допустимой инженерной погрешности.

Проведённые эксперименты полностью подтвердили работоспособность макетного образца и высокую адекватность разработанных аналитических выражений для расчёта магнитного поля и электромагнитного момента в беспазовых синхронных машинах с дробными катушечными обмотками ($q < 1$).

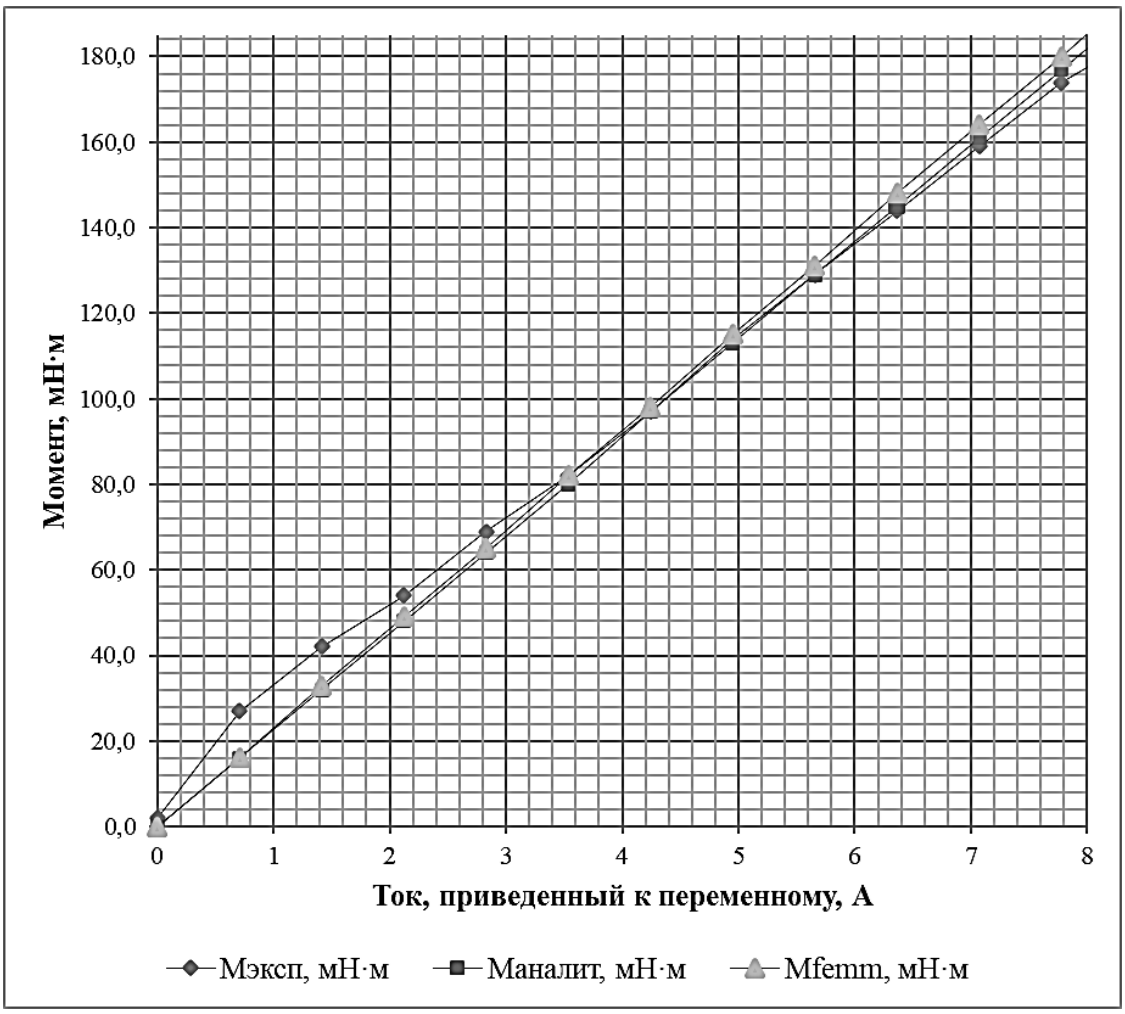


Рисунок 13 – Сравнение полученных зависимостей момента от тока статора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующее результаты:

1. Выполнен сравнительный анализ синхронных электрических машин с пазовой и беспазовой конструкцией статора, на основании которого определены области наиболее эффективного применения беспазовых синхронных машин с постоянными магнитами. Показано, что их использование наиболее целесообразно в высокоскоростных электроприводах и прецизионных исполнительных механизмах.

2. Проведен гармонический анализ магнитодвижущих сил дробных катушечных обмоток с числом пазов на полюс и фазу $q < 1$ беспазовых синхронных машин. Получены аналитические выражения для гармонического разложения МДС одиночной катушки, фазной зоны и многофазной обмотки, а также систематизированы данные гармонического состава для распространенных конфигураций обмоток (на примере $q = 2/5$ и $q = 3/8$). Выявлены закономерности влияния геометрических параметров катушек на амплитуды рабочих гармоник МДС и условия формирования пульсаций электромагнитного момента. Математически доказано полное отсутствие зубцовой составляющей пульсаций момента, а также показано, что путём взаимного согласования геометрии катушек и ширины полюсов постоянных магнитов ротора общий уровень пульсаций от высших пространственных гармоник снижается до значений менее 1%.

3. Разработан метод аналитического расчёта электромагнитного момента беспазовых синхронных электрических машин с постоянными магнитами и дробными катушечными обмотками. В основу метода положена математическая модель распределения магнитного поля в воздушном зазоре, полученная в аналитическом виде с применением функций Грина, что позволило учесть реальные геометрические размеры источников возбуждения. На основе решений для компонент магнитной индукции с использованием тензора напряжений Максвелла выведено компактное выражение для расчёта электромагнитного момента. Достоверность метода подтверждена численным моделированием: максимальное расхождение результатов аналитического и конечно-элементного расчётов составило менее 0,4%, что доказывает практическую ценность предложенного подхода для проведения предварительных расчётов на начальных этапах проектирования машин данного класса.

4. Проведены экспериментальные исследования макетного образца беспазовой синхронной электрической машины с постоянными магнитами, подтвердившие достоверность разработанного аналитического метода определения магнитных полей и электромагнитного момента. Подтверждено, что предложенные аналитические зависимости позволяют проводить проектирование беспазовых синхронных машин с обеспечением требуемой достоверности результатов при существенном сокращении временных и вычислительных затрат по сравнению с численным моделированием методом конечных элементов.

Научные результаты работы создают основу для дальнейшего развития теории и практики проектирования беспазовых электромеханических преобразователей по следующим направлениям:

1) Расширение аналитического аппарата: развитие предложенной полевой модели для расчета индуктивностей обмоток, что позволит прогнозировать динамические характеристики и быстродействие приводов.

2) Исследование тепловых режимов: разработка методики теплового расчета для обоснования предельных нагрузочных режимов и обеспечения надежности функционирования системы.

3) Совершенствование технологии производства: разработка методов фиксации обмотки в немагнитном зазоре, обеспечивающих высокую механическую прочность, повторяемость геометрии и эффективный отвод тепла.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК РФ, в т.ч. переводные версии статей проиндексированы в международной базе данных Scopus):

1. **Гейнрих, Г. О.** Характеристики электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов с пазовой и беспазовой конструкцией статора / **Г. О. Гейнрих**, А. Ф. Шевченко // Электротехника. – 2023. – № 5. – С. 34-38. – DOI 10.53891/00135860_2023_5_35.

2. **Гейнрих, Г. О**. Магнитодвижущие силы беспазовых электрических машин с дробными обмотками с числом катушек на полюс и фазу q < 1 / **Г. О. Гейнрих**, А. Ф. Шевченко, Д. Ю. Бабицкий // Электротехника. – 2024. – № 2. – С. 27-34. – DOI 10.53891/00135860-2024-2-27-34.

3. **Гейнрих, Г. О.** Пульсации электромагнитного момента синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов беспазовой конструкции / **Г. О. Гейнрих**, А. Ф. Шевченко // Электротехника. – 2024. – № 5. – С. 32-35. – DOI 10.53891/00135860-2024-5-32-35.

4. Шевченко, О. А. Расчёт магнитного поля беспазового двигателя с постоянными магнитами и дробными катушечными обмотками / О. А. Шевченко, **Г. О. Гейнрих**, А. Ф. Шевченко // Электротехника. – 2025. – № 6. – С. 7-14. – DOI 10.53891/00135860-2025-6-7-14.

5. **Гейнрих, Г. О.** Электромагнитный момент беспазового двигателя с постоянными магнитами и дробными катушечными обмотками / Г. О. Гейнрих, О. А. Шевченко, А. Ф. Шевченко // Электротехника. – 2025. – № 7. – С. 21-24. – DOI 10.53891/00135860-2025-7-21-24.

Научные результаты диссертации отражены также в других ***научных публикациях, материалах конференций:***

6. **Гейнрих, Г. О.** К выбору сфер применения синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов с беспазовой конструкцией статора / **Г. О. Гейнрих**, Д. Ю. Бабицкий // Наука. Технологии. Инновации : XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых: Сборник научных трудов в 11-ти частях, Новосибирск, 04–08 декабря 2023 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2024. – С. 57-60.

7. **Гейнрих, Г. О.** Анализ особенностей беспазовых электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов / **Г. О. Гейнрих**, А. Ф. Шевченко // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов XVI Всероссийской научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 05–08 декабря 2022 года. Том Часть 5. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2022. – С. 12-16.

8. **Гейнрих, Г. О.** Расчёт и верификация электромагнитного момента в беспазовых электродвигателях с возбуждением от постоянных магнитов / **Г. О. Гейнрих**, А. В. Полуэктова // Наука. Технологии. Инновации: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции молодых ученых. В 9-и частях, Новосибирск, 08–12 декабря 2025 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2026. – С. 64-68.

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-05919 подписано в печать 06.11.2026 г.