

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

На правах рукописи



Саяхов Ильдус Финатович

**РАЗРАБОТКА БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ ДИСКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАШИН С МАГНИТНОЙ СБОРКОЙ ХАЛЬБАХА ДЛЯ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 2.4.2 –Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Исмагилов Флор Рашитович

Уфа – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ДИСКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	13
1.1 ЭМ с высокими удельными характеристиками для авиационной отрасли.....	13
1.1.1 Конструкции электрических машин с постоянными магнитами.....	18
1.2 Классификация конструкций дисковых электрических машин.....	20
1.2.1 Классификация дисковых ЭМ	20
1.2.2 Примеры использования дисковых ЭМ в авиационной отрасли.....	26
1.3 Материалы для дисковых электрических машин.....	29
1.3.1 Традиционные материалы	29
1.3.1.1 Постоянные магниты	29
1.3.1.2 Сердечник ротора.....	30
1.3.1.3 Сердечник статора.....	32
1.3.1.4 Обмотки.....	33
1.3.1.5 Конструкционные материалы	34
1.3.2 Анализ перспективных материалов для дисковых электрических машин	35
1.3.2.1 Электрические машины из композитных материалов	35
1.3.2.2 Использование КМ в качестве конструктивных узлов ЭМ	36
1.3.2.3 Использование КМ для систем охлаждения	37
1.3.2.4 Использование композитных материалов в качестве материала статора электрических машин	38
1.3.2.5 Использование композитных материалов для изготовления обмоток электрических машин	39
1.3.2.6 Использование композитных материалов для создания постоянных магнитов	40
Выводы к главе 1	41
ГЛАВА 2. ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИСКОВЫХ ЭМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ	43
2.1 Определение крутящего момента.....	43

2.2 Ограничивающие факторы.....	46
2.3 Характеристики дисковой ЭМ в dq-системе координат	47
2.4 Число пар полюсов и число пазов статора	48
2.5 Обмотка статора и обмоточный коэффициент.....	50
2.6 Размеры постоянного магнита	52
Выводы к главе 2	56
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	58
3.1 Допущения при моделировании дисковых электрических машин.....	58
3.2 Исследование влияния материала сердечника статора на массу дисковой ЭМ	60
3.3 Исследование конструкций дисковых ЭМ	66
3.4 Исследование компьютерной модели безжелезной дисковой электрической машины с параметрической оптимизацией размеров постоянных магнитов.....	70
3.4.1 Описание конструкции, исследуемой дисковой ЭМ.....	70
3.4.2 Оценка влияния относительного углового размера тангенциально намагниченного постоянного магнита в сборке Хальбаха на характеристики дисковой ЭМ.....	71
Выводы к главе 3	74
ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДИСКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ.....	76
4.1 Машины с высокотемпературными сверхпроводящими материалами.....	76
4.2 Исследование конструкций дисковых ЭМ с ВТСП-обмотками и криогенным охлаждением	79
Выводы к главе 4	87
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗЖЕЛЕЗНОГО ДИСКОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СО СБОРКОЙ ХАЛЬБАХА	89
5.1 Проектирование безжелезного дискового электродвигателя.....	89
5.2 Программа и методика испытаний безжелезного дискового электродвигателя	97

5.3 Описание макетного образца и экспериментальные исследования	100
Выводы к главе 5	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108
Приложение	119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В аэрокосмической отрасли сокращение вредных выбросов в окружающую среду, уменьшение шума и повышение топливной эффективности требует внедрения инновационных технологий. В настоящее время это одно из перспективных направлений развития авиационной отрасли во всем мире. Это означает, что необходимо разрабатывать альтернативные силовые установки, эффективность которых будет значительно выше, а масса при этом ниже чем у существующих образцов. В качестве альтернативы возможно использование гибридной силовой установки (ГСУ) или электрической силовой установки (ЭСУ) [1, 2].

В настоящее время электрические машины (ЭМ), применяемые в ГСУ и ЭСУ на летательных аппаратах (ЛА) обладают недостаточно высокой удельной мощностью. При этом наиболее широко применяются ЭМ с постоянными магнитами (ПМ) и внешним ротором, а также дисковые ЭМ с ПМ.

Для привода воздушного винта самолета, винта электрического вертолета, винтов беспилотных ЛА имеются ограничения по осевой длине. Одним из основных преимуществ дисковых ЭМ является возможность встраивания в системы с малой аксиальной длиной, что позволяет интегрировать их напрямую с приводом без риска увеличения габаритов ЛА [3, 4].

Дисковые ЭМ уже находят широкое практическое применение в авиационной отрасли в качестве привода воздушного винта. При этом наибольшей перспективой обладают безжелезные дисковые ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха, благодаря возможности достижения высокой удельной мощности и создания эффективного воздушного охлаждения [5].

В конструкции безжелезной дисковой ЭМ благодаря отсутствию магнитопровода упрощается технология создания статора, устраняются потери в стали и снижается полная масса. Кроме того, применение зубцовой обмотки на статоре позволяет снизить габаритные размеры и потери в меди благодаря коротким вылетам лобовых частей. Использование магнитной сборки Хальбаха на

дисковом роторе позволяет отказаться от ярма для прохождения магнитного потока и заменить его материалом с низкой плотностью. Все это в целом позволяет создать дисковую ЭМ с малой аксиальной длиной и высокой удельной мощностью, что является важным для авиационной отрасли.

В связи с обозначенными преимуществами, проведение исследований по повышению удельных характеристик, а также усовершенствование конструкций безжелезных дисковых ЭМ с ПМ является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Вклад в разработку и исследование дисковых электрических машин внесли российские и зарубежные ученые А.Н. Ледовский, Д.А. Бут, С.А. Ганджа, А.В. Иванов-Смоленский, Ю.Б. Казаков, Е.Б. Герасимов, А.И. Бертинов, J.E. Gieras, J.R. Hendershot, T.J.E. Miller, T.J. Woolmer и многие другие.

Несмотря на достаточное число публикаций, посвященных дисковым ЭМ, многие вопросы в области проектирования безжелезных конструкций дисковых ЭМ и исследования в направлении повышения их удельных характеристик остаются мало разработанными и являются актуальными на сегодняшний день.

Цель работы: улучшение энергетических показателей при проектировании безжелезных дисковых ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха.

Объект исследования: дисковые ЭМ с постоянными магнитами.

Предмет исследования: электромагнитные процессы в дисковых ЭМ.

Задачи, решаемые в диссертации:

1. Анализ современного состояния и перспектив использования дисковых ЭМ в качестве привода воздушного винта ЛА.

2. Разработка элементов методики проектирования безжелезных дисковых ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха. Расчеты параметров дисковых ЭМ различной конструкции численными методами. Разработка компьютерной модели безжелезной дисковой ЭМ с элементами параметрической оптимизации магнитной сборки Хальбаха.

3. Анализ применения высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов в ЭМ. Разработка компьютерной модели дисковой ЭМ с ВТСП обмотками и элементами параметрической оптимизации паза статора.

4. Разработка программы и методики испытаний и экспериментальное исследование макетного образца безжелезной дисковой ЭМ.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались аналитические методы теории электромеханических преобразователей энергии, методы компьютерного моделирования.

Научная новизна:

1. Разработаны элементы методики проектирования безжелезных дисковых электрических машин, которые позволяют определить начальные геометрические размеры активных частей статора и ротора для последующего построения компьютерной модели и расчета с использованием метода конечных элементов.

2. Произведена параметрическая оптимизация постоянных магнитов в магнитной сборке Хальбаха на основе компьютерной модели безжелезной дисковой электрической машины, которая позволила выявить оптимальные соотношения размеров постоянных магнитов для улучшения массогабаритных и энергетических характеристик проектируемой безжелезной дисковой электрической машины.

3. Разработана методика и получены результаты параметрической оптимизации дисковой электрической машины с обмотками из высокотемпературных сверхпроводников, в которой впервые на основе уточненной компьютерной модели получены оптимальные соотношения размеров пазов статора.

Обоснование и достоверность результатов. Результаты подтверждаются использованием обоснованных допущений, компьютерным моделированием, использованием аттестованного оборудования для проведения экспериментов, приемлемой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны элементы методики проектирования безжелезных дисковых ЭМ, позволяющие определить габаритные размеры, геометрические размеры ПМ, катушек статора и обмоточные данные.

Проведена параметрическая оптимизация угловых размеров ПМ в магнитной сборке Хальбаха посредством конечно-элементного моделирования по критерию максимальной индукции в воздушном зазоре.

Определены основные ограничения при использовании ВТСП обмоток в составе ЭМ и выработаны рекомендации для проектирования с учетом конструкционных и электромагнитных ограничений ВТСП материалов. Проведена параметрическая оптимизация размера паза статора дисковой ЭМ с ВТСП обмотками, посредством конечно-элементного моделирования по критерию минимальной индукции, действующей на ВТСП обмотку.

Связь работы с научными программами. Исследования по данной тематике проводились в рамках:

1. НИР «Разработка электрического двигателя с системой управления для маршевой ГСУ лёгкого вертолета», Шифр «Перспективные ГСУ-ЭТК-2021».
2. НИР «Расчетно-экспериментальные исследования демонстратора гибридной силовой установки для перспективных летательных аппаратов», Шифр «Электролет СУ-2020-УГАТУ».
3. НИР «Исследования и разработки технологий, обеспечивающих создание перспективных гибридных/электрических СУ для гражданских ЛА различного назначения», «Перспективные ГСУ-УГАТУ-2020».

Положения, выносимые на защиту:

1. Элементы методики проектирования безжелезных дисковых ЭМ, заключающиеся в предварительном расчете основных размеров и обмоточных данных для последующего построения компьютерной модели и расчета МКЭ, отличающаяся от известных ускоренным процессом проектирования.
2. Методика и результаты параметрической оптимизации ПМ в магнитной сборке Хальбаха с использованием разработанной компьютерной

модели безжелезной дисковой ЭМ, в которой впервые учтены соотношения между аксиально и тангенциально намагниченными ПМ.

3. Методика и результаты параметрической оптимизации размеров паза статора дисковой ЭМ с ВТСП обмотками с использованием разработанной компьютерной модели, отличающейся учетом величины воздействующего переменного магнитного поля на ВТСП, а также учетом размеров криостата и радиуса изгиба ВТСП лент.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2017-2020 гг.); международной научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (Уфа, 2018-2021 гг.); XII всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2018-2019 гг.); X всероссийской конференции по автоматизированному электроприводу (Новочеркасск, 2018 г.); международной научно-технической конференции XXIV «Туполевские чтения» (Казань, 2019 г.); международном семинаре по проектированию и технологии производства электронных средств (Прага, 2019 и 2021 г.); международном семинаре по электроприводам (Москва, 2019 и 2021 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 4 – в печатных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 – в журналах, индексируемых в базе Scopus; получены 3 патента РФ на изобретения, 1 патент на полезную модель и 3 свидетельства о регистрации программы ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка. Диссертация изложена на 119 страницах, содержит 65 рисунков, 20 таблиц и одно приложение. Библиографический список содержит 105 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе проведен обзор существующих ЭМ с высокими удельными характеристиками для летательных аппаратов и определены ключевые вопросы,

стоящие перед ЭМ для авиационной отрасли. На основе обзора определены основные тенденции и направления развития электрических машин с высокими удельными характеристиками. Проведен обзор электротехнических и конструкционных материалов, применяемых в дисковых ЭМ, а также оценены перспективы применения композитных материалов в дисковых ЭМ. Проанализированы конструкции ЭМ с постоянными магнитами, в том числе дисковых ЭМ, и определена перспективность их применения в ЛА. Приведена классификация конструкций дисковых ЭМ и определены их особенности с примерами реализации в летательных аппаратах.

Во второй главе разработаны элементы методики проектирования дисковых ЭМ безжелезной конструкции, позволяющие получить начальное приближенное решение для последующего построения компьютерной модели и анализа с использованием МКЭ. Приведены методы расчета крутящего момента дисковой ЭМ с одним ротором из литературных источников.

Представлены рекомендации по выбору числа пар полюсов и числа сегментов статора (в случае расчета с магнитопроводящим статором – зубцов). Преимуществами большого числа полюсов являются более плавный крутящий момент, более высокий обмоточный коэффициент и крутящий момент, однако есть и ограничение: повышение электромагнитной частоты, которая приводит к увеличенным потерям на вихревые токи и рассеяние магнитного потока.

Приведены выражения для определения геометрических размеров постоянных магнитов через величину магнитной индукции в воздушном зазоре и характеристики постоянных магнитов, а также размеров сегмента статора. Представлены характеристики дисковой ЭМ в dq-системе координат, приближенный расчет индуктивностей, а также потерь и КПД дисковой ЭМ.

В третьей главе разработаны компьютерные модели и проведены электромагнитные расчеты дисковых ЭМ посредством конечно-элементного моделирования. Компьютерные модели были разработаны в программном пакете Ansys Electronics Desktop. Допущением была принята двумерная (2D) постановка

задачи, что позволяет повысить скорость расчетов без существенного снижения точности по сравнению с трехмерной (3D) постановкой.

Проведено численное моделирование разных конструктивных исполнений дисковых ЭМ и определены наиболее эффективные варианты, позволяющие обеспечить максимально возможные энергетические характеристики. Согласно результатам электромагнитных расчетов установлено, что безжелезная дисковая ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха обладает наибольшим значением удельной мощности среди рассмотренных конструкций.

С применением компьютерной модели, проведена параметрическая оптимизация энергетических параметров безжелезной дисковой ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха. Целью оптимизации являлось обеспечение максимального магнитного потока в воздушном зазоре при изменении угловых размеров ПМ в магнитной сборке Хальбаха. Ограничениями выступают высота ПМ, длина ПМ и величина воздушного зазора. Критерием оптимизации выбрана максимальная индукция в воздушном зазоре на холостом ходу, так как от данного параметра зависит электромагнитная мощность ЭМ.

Увеличение углового размера тангенциально намагниченных ПМ ведет к росту величины максимальной индукции в воздушном зазоре на 20%. Однако увеличение углового размера тангенциально намагниченных ПМ более чем в 1,5 раза от начального углового размера приводит к снижению максимальной индукции в воздушном зазоре из-за увеличения потоков рассеяния между полюсами. Это позволяет сделать вывод о том, что варьирование угловых размеров ПМ позволяет повысить плотность магнитного потока в воздушном зазоре и, следовательно, увеличить энергетические характеристики дисковой ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха.

В четвертой главе приведен обзор применения ВТСП материалов в ЭМ. Из обзора установлено, что применение ВТСП материалов в качестве обмоток статора позволяет повысить плотности тока и линейные токовые нагрузки, что ведет к повышению удельной мощности ЭМ. Из обзора также определены основные ограничения при использовании ВТСП в составе обмоток ЭМ.

Разработаны компьютерные модели дисковых ЭМ с ВТСП материалами в двигательном режиме работы при номинальной мощности 60 кВт и частоте вращения 2000 об/мин с учетом конструкционных и электромагнитных ограничений ВТСП материалов, а также размеров криостата.

С применением разработанной компьютерной модели была проведена параметрическая оптимизация паза статора дисковой ЭМ с ВТСП обмотками. Целью оптимизации являлась минимизация потоков рассеяния в пазу статора, а критерием оптимизации - обеспечение минимальной магнитной индукции, действующей на ВТСП ленту в перпендикулярном направлении. В качестве ограничения выступал минимально допустимый размер высоты паза, определенный размером криостата. Переменной являлась высота паза статора. Для оптимизации применялся метод упорядоченного перебора. С увеличением высоты паза наблюдается снижение величины магнитной индукции, действующей на ВТСП обмотку. Однако при увеличении высоты паза статора, на 28% от начальной величины, магнитная индукция начинает возрастать, что связано с увеличением потоков рассеяния. Следует также отметить, что при увеличении высоты паза также возрастают потери в стали и масса магнитопровода статора. Таким образом, рекомендацией при проектировании ЭМ с ВТСП обмотками является увеличение высоты паза статора до 28% от начальной величины (определяемой размером криостата) с целью минимизации индукции, действующей на ВТСП ленту.

В пятой главе проведено экспериментальное исследование макетного образца безжелезного дискового электродвигателя (ЭД) с магнитной сборкой Хальбаха. Разработана программа и методика испытаний дискового ЭД. Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys имеют максимальное расхождение менее 10%.

В заключении подведены итоги исследования и представлены его основные результаты.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ДИСКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В настоящее время ГСУ и ЭСУ являются одними из перспективных технологий для летательных аппаратов (ЛА). Электрические машины в качестве приводных двигателей и генераторов для ЛА в основном имеют такую существенную проблему, как недостаточная удельная мощность [6- 8].

Для электрических машин ЛА проблема достижения высокой удельной мощности является критической: существуют ЭМ с относительно высокой удельной мощностью (3-5 кВт/кг), но они обладают высокими частотами вращения ($n > 10000$ об/мин), где снижение массы достигается за счет повышения электромагнитной частоты [9]. Было выполнено множество исследований по применению и компоновкам электрического двигателя самолета, как показано, например, в работах [10-15]. Однако экспериментальных работ на данный момент проведено очень мало, и их заключения обычно указывают на чрезмерные размеры и массу ЭМ. Ожидается, что в будущем ЭМ для авиационных силовых установок будут иметь мощность не менее 10-20 кВт/кг [16, 17].

1.1 ЭМ с высокими удельными характеристиками для авиационной отрасли

Аэрокосмическая промышленность – это область, которая требует значительного увеличения удельной мощности ЭМ. Сюда входят более электрические самолеты (БЭС) [18, 19], гибридная/электрическая силовая установка [20-22], электрическое руление по взлетно-посадочной полосе [23], а также беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с вертикальным взлетом и посадкой (ВВП) [24]. Все вышеупомянутые электрические машины используются в относительно новых и нестандартных областях. К ним относятся: 1) генераторы ГСУ, 2) двигатели, приводящие в движение воздушные винты в случае гибридной или электрической тяги, 3) колесные двигатели для руления по взлетно-посадочной полосе и 4) двигатели, обеспечивающие вертикальный подъем и движение в случае БПЛА с ВВП. Роли ЭМ в этих областях применения разительно отличаются от

традиционных ролей в авиационной отрасли, которые в основном включают в себя генераторы (подключенные к ГТД через валы отбора мощности), небольшие двигатели, приводящие в действие различные нагрузки (насосы, вентиляторы), а также электрические приводы (система управления летательного аппарата). Эти новые области применения предъявляют к ЭМ значительно более высокие требования, когда дело доходит до удельной мощности и эффективности (поскольку оба этих показателя оказывают значительное влияние на удельный расход заряда АКБ в ЭСУ и топлива в ГСУ).

В настоящее время растет интерес к электрическим машинам с высокой удельной мощностью. В работе [25] представлен обзор конструкций электрических машин, применяемых в различных областях. В другом обзоре, представленном в работе [26], выделяются ключевые технологии, которые используются в высокоскоростных машинах, а также определяются безопасные пределы геометрических размеров с точки зрения механики и динамики ротора. В работе [27] приведен обзор электрических машин с высокой удельной мощностью. В работе [28] основное внимание обращено на удельную мощность электрической машины и представлено общее сравнение различных конструкций ЭМ. Рассмотренные выше публикации представляют собой обширную работу по сбору и структуризации информации о современных ЭМ, применяемых в составе устройств и систем ЛА. Таблицы 1.1-1.3 содержат различные электрические машины с разбивкой по номинальной мощности [25-28].

Таблица 1.1 – ЭМ с мощностью более 100 кВт

Производитель	Siemens	Honeywell	ENSTROJ – Slovenia	Royce-University of Sheffield
Применение	Самолет с 4 и более местами	Генератор для ГСУ	Электрический планер	Стартер-генератор турбовентиляторного двигателя
Конструкция ЭМ	Ротор со сборкой Хальбаха	Синхронная с обмоткой возбуждения	Дисковая	ПМ на поверхности ротора

Охлаждение	Прямое охлаждение проводников	Масляное охлаждение	Комбинированное охлаждение (жидкостное и воздушное)	Внешняя рубашка охлаждения
Масса, кг	50	126,5	20,3	22,7
Напряжение питания, В	580	300-600	700	540
КПД, %	95	97	98	96
Номинальная мощность, кВт	260	1000	100	100
Удельная мощность, кВт/кг	5,2	7,9	4,9	4,4
Номинальная частота вращения, об/мин	2500	19000	4000	27000

Таблица 1.2 – ЭМ с мощностью от 10 до 100 кВт

Производитель	Rotex-Czech Republic	Siemens and EADS-Germany	ACENTISS-Germany	Yuneeс – China	University of Nottingham
Применение	Малый электрический самолет	ГСУ для 2-местного планера <i>Diamond Aircraft</i>	Малый электрический самолет	Малый электрический самолет	Привод рулевого колеса самолета
Конструкция ЭМ	Внешний ротор с постоянными магнитами	ПМ на поверхности ротора	Два электродвигателя на общем приводном валу пропеллера	Внешний ротор с постоянными магнитами	Внешний ротор со сборкой Хальбаха
Охлаждение	Воздушное и жидкостное охлаждение	Прямое масляное охлаждение обмотки	Воздушное охлаждение	Воздушное охлаждение	Воздушное охлаждение
Масса, кг	20	13	11	8,2	10,8
Напряжение питания, В	800	545	58	67	-
КПД, %	95	95	94	96	95
Номинальная мощность, кВт	50	65	32	20	55
Удельная мощность, кВт/кг	2,5	5	2,9	2,4	5,09
Номинальная частота вращения, об/мин	2200	5000	2200	2400	1800

Таблица 1.3 – ЭМ с мощностью до 10 кВт

Производитель	Launchpoint	KDE Direct	Joby Motors	ThinGap
---------------	-------------	------------	-------------	---------

Применение	БПЛА	Электрический вертолет с дистанционным управлением	Самолеты с дистанционным управлением	БЛА
Конструкция ЭМ	Дисковая безжелезная с двойным ротором и сборками Хальбаха	Внешний ротор	ПМ на поверхности ротора	Внешний ротор с постоянными магнитами
Охлаждение	Воздушное охлаждение	Воздушное охлаждение	Воздушное охлаждение	Воздушное охлаждение
Масса, кг	0,64	0,695	1,8	1,59
Напряжение питания, В	–	50,4-67,2	40-450 (в зависимости от соединения обмоток)	–
КПД, %	95	93	85-95	91
Номинальная мощность, кВт	5,22	7,2	8,2	4
Удельная мощность, кВт/кг	8,2	10,4	4,6	2,5
Номинальная частота вращения, об/мин	8400	14900	6000	7987

Помимо параметра удельной мощности в электрической машине существует несколько аспектов, которые не менее важны. Опишем их.

1. Удельная мощность в зависимости от КПД.

Обычно в ЭМ для авиационной отрасли основное внимание уделяется удельной мощности, однако КПД является еще одним ключевым показателем. Удельный расход топлива в ГСУ зависит как от удельной мощности, так и от КПД. В зависимости от общей архитектуры системы в некоторых случаях лучше спроектировать электрическую машину с меньшей удельной мощностью и более высоким КПД.

2. Отказоустойчивость.

Как видно из приведенного обзора, ЭМ с постоянными магнитами (ПМ) являются доминирующим типом машин, поскольку обладают высокой удельной мощностью и КПД. При этом в областях применения, где безопасность критически важна, необходимо учитывать отказоустойчивость, что, в свою очередь, может привести к значительному снижению удельной мощности. Некоторые из рассмотренных конструкций, которые не содержат железа или имеют обмотки,

расположенные в воздушном зазоре, обычно имеют очень низкие индуктивности. Это приводит к высоким токам короткого замыкания, что неприемлемо с точки зрения безопасности.

3. Напряжение питания.

Несмотря на то что все машины, представленные в обзоре, имеют низкое напряжение, для мегаваттных ЭМ потребуется более высокое напряжение системы, превышающее 2 кВ постоянного тока. Это в основном предназначено для уменьшения сечения и массы проводников, что может сказаться на общей удельной мощности системы. Однако более высокое напряжение в системе создает проблему с точки зрения усложнения коммутации и увеличения изоляции, необходимой для выдерживания таких уровней напряжения. Вследствие этого необходимо будет использовать более толстую изоляцию, что значительно усложнит тепловое состояние электрических машин.

4. Управление ЭМ.

Параметры машины, влияющие на управление, являются ключевыми факторами, которые необходимо учитывать при проектировании ЭМ с высокой удельной мощностью. Если машина спроектирована с низкой индуктивностью, это создает проблемы для системы управления, которая держит под контролем пульсации тока (чтобы минимизировать их влияние на потери и пульсации крутящего момента). Другой параметр – это основная частота ЭМ, чем она выше, тем выше частота переключения вентиля, необходимая для поддержания высокого качества формы кривой тока. Более высокая частота коммутации вентиля может отрицательно сказаться на изоляции и размере фильтров. Кроме того, это может привести к более высоким коммутационным потерям в преобразователе и, следовательно, к снижению общей эффективности системы.

Таблицы 1.1-1.3 включают в себя основной объем доступной информации, которая позволяет установить технологические тенденции ЭМ в составе ГСУ. Общие тенденции включают в себя:

– электрические машины большой мощности (более 100 кВт) применяются и в небольших самолетах (4 места и более), и в больших коммерческих самолетах

(машины *Honeywell*). Электрические машины мощностью от 10 до 100 кВт в основном используются для небольших самолетов; электрические машины мощностью менее 10 кВт в основном относятся к БПЛА и малым самолетам с дистанционным управлением;

– машины большой мощности более 100 кВт в основном имеют жидкостное охлаждение. Машины меньшей мощности менее 100 кВт в основном имеют принудительное воздушное охлаждение;

– в низкоскоростных машинах наиболее часто применяются зубцовые обмотки. В высокоскоростных машинах (частота более 1 кГц) больше применяются распределенные обмотки для снижения высших пространственных гармоник, а также для косвенного охлаждения проводников (погруженный статор, распылительное охлаждение и охлаждающая рубашка);

– все массы ЭМ приведены без учета охлаждающей жидкости. Если включить массы охлаждающих жидкостей, разница в удельной мощности между жидкостным и воздушным охлаждением уменьшается;

– все представленные машины считаются низковольтными машинами (напряжение постоянного тока на шине менее 800 В);

– низкоскоростные машины (менее 3000 об/мин), как правило, имеют более высокий удельный крутящий момент, в то время как машины с более высокой частотой вращения (8000–24000 об/мин), как правило, имеют более высокую удельную мощность;

– большинство представленных машин имеют значительно более высокую удельную мощность и удельный крутящий момент по сравнению с машинами, используемыми в автомобильной отрасли;

– все высокоэффективные машины используют ПМ (радиальные с внутренним ротором, радиальные с внешним ротором и дисковые с осевым потоком).

1.1.1 Конструкции электрических машин с постоянными магнитами

Для электромеханического преобразования энергии в основном используются три типа электрических машин: синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ), асинхронные машины (АМ) и вентильно-индукторные машины (ВИМ). Все типы машин широко исследованы: определены их преимущества и недостатки для различных режимов работы (двигательный, генераторный). Было определено, что СМПМ имеют преимущество с точки зрения мощности, массы и КПД [29]. В отличие от СМПМ, в АМ и ВИМ отсутствует встроенное возбуждение, которое напрямую влияет на их характеристики: им требуются более высокие токи намагничивания и больший объем активных материалов для достижения сопоставимых характеристик с СМПМ.

Простые и надежные по своей конструкции, АМ и ВИМ начинают уступать СМПМ в отраслях, где они обычно считались основными: тяговые двигатели средней и большой мощности, транспортные средства и судовые двигатели [30-32]. Кроме того, конструкции СМПМ с прямым приводом представляют особый интерес для использования в аэрокосмической отрасли. Также приобретает все большее значение привод транспортных средств [33-35], что также применимо для приводов самолетов. При этом, согласно исследованиям, при реализации прямого привода достигается значительное снижение массы [36, 37].

В системах, где критичными являются масса и габариты, СМПМ с зубцовыми обмотками являются наилучшим вариантом для получения высокой удельной мощности при использовании традиционных материалов. В данной конструкции электрической машины возникают некоторые паразитные эффекты: повышенная пульсация крутящего момента, потери в стали от высших пространственных гармоник, а также меньшая синусоидальность формы обратной ЭДС. В то же время это дает возможность построить низкогабаритную машину с короткими лобовыми частями обмотки и высокими коэффициентами заполнения пазов [38, 39]. Такие конструкции позволяют наиболее рационально использовать ограниченное пространство в местах установки на летательных аппаратах.

Для авиационной отрасли вопрос создания конструкций электрических машин с высокими удельными характеристиками и малыми габаритами является

наиболее критичным. К примеру, для привода воздушного винта БЭС, привода винта электрического вертолета, приводов винтов БЛА, привода шасси самолета требуется малая осевая длина ЭМ.

Одним из типов ЭМ с высокими удельными характеристиками и малыми габаритами является дисковая ЭМ [40-42]. Эти свойства и определяют интерес к этому типу электрических машин в авиации. Малая осевая длина дисковых ЭМ позволяет интегрировать их напрямую с приводом без риска увеличения габаритов летательного аппарата.

1.2 Классификация конструкций дисковых электрических машин

1.2.1 Классификация дисковых ЭМ

Классификация конструкций дисковых машин состоит из общих структур, определенных в соответствии с количеством статоров и роторов [43, 44]. Односторонняя машина с одиночным статором и одиночным ротором (рисунок 1.1, *а*) является наиболее элементарной конструкцией, от которой произошли двухсторонние машины: с двойным ротором (рисунок 1.1, *б*) и двойным статором (рисунок 1.1, *в*). Односторонняя конструкция дисковой машины проще, чем двухсторонняя, однако ее выходная мощность ниже. Двухсторонняя машина с двойным статором и параллельным соединением обмоток может работать с пониженной выходной мощностью, даже если одна из обмоток выйдет из строя.

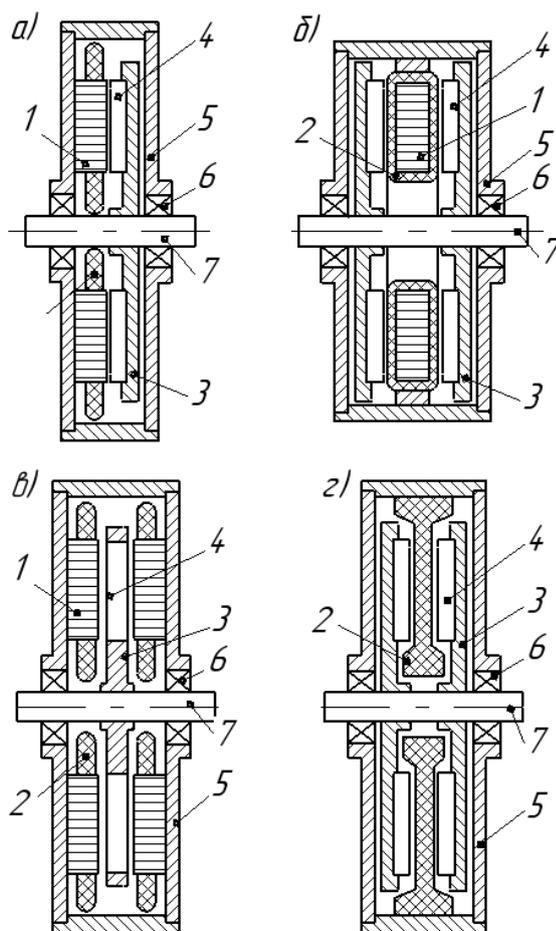


Рисунок 1.1 – Основные конструкции дисковых машин:

а – односторонняя с пазовым статором; *б* – двухсторонняя с внутренним беспазовым статором;
в – двухсторонняя с внутренним ротором; *г* – двухсторонняя с внутренним безжелезным статором;

1 – магнитопровод статора; 2 – обмотка статора; 3 – ротор; 4 – ВПМ; 5 – корпус;
 6 – подшипники; 7 – вал

Следующий уровень классификации основан на материале сердечника статора, будь то сердечник из железа (с пазами на статоре или беспазовый) или без сердечника (безжелезная конструкция). В категорию железных сердечников также входят статоры, изготовленные из нетрадиционных материалов, таких как магнитомягкие композиты или аморфные сплавы.

Воздушный зазор пазовой дисковой машины относительно мал, благодаря чему достигаются высокие значения магнитной индукции в воздушном зазоре. Средняя магнитная индукция в воздушном зазоре несколько уменьшается из-за влияния открытых пазов.

Для дисковых машин с беспазовым статором зазор намного больше и равен сумме воздушного зазора и толщины всех немагнитных материалов (обмоток, изоляции), через которые проходит основной магнитный поток.

Дисковая машина с безжелезным статором (рисунок 1.1, з) и двойными роторами имеет обмотку, расположенную на немагнитной и изолированной конструкции. Тем самым, благодаря отсутствию магнитопровода статора, исключаются зубцовый момент, потери на вихревые токи, а также гистерезисные потери. Однако при этом возрастают потери на вихревые токи в проводниках обмотки, поэтому становится необходимым применение проводников малого диаметра или из лицендрата. К тому же, для обеспечения необходимой величины магнитного потока в немагнитном зазоре требуется значительно больший объем магнитов по сравнению со стальной конструкцией статора. Повышения величины магнитного потока в немагнитном зазоре безжелезной дисковой машины также можно достичь путем применения магнитной сборки Хальбаха (рисунок 1.2), при этом необходимость в стальном ярме ротора отпадает. Таким образом, безжелезная конструкция дисковой ЭМ со сборкой Хальбаха потенциально обладает наибольшей удельной мощностью и энергоэффективностью.

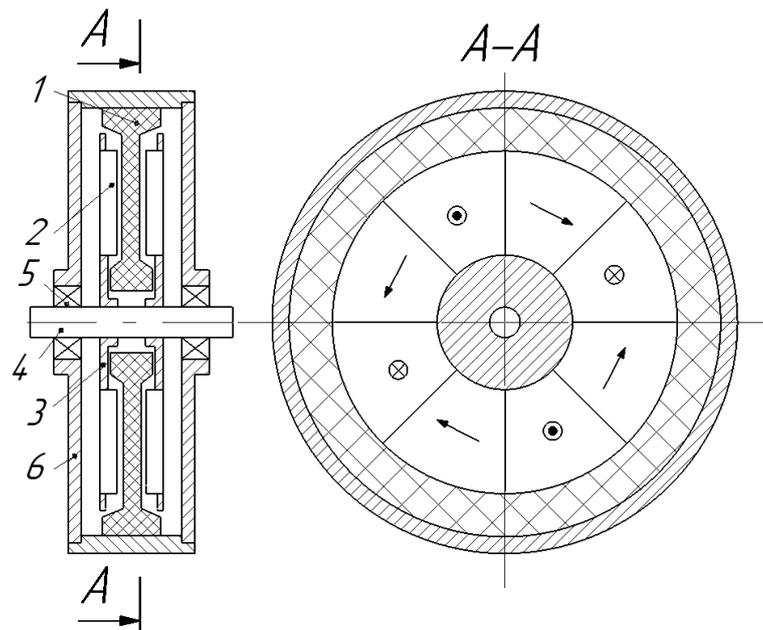


Рисунок 1.2 – Двухсторонняя дисковая машина без магнитопроводов на статоре и роторе:

1 – обмотка беспазового безжелезного статора; 2 – ВПМ с магнитной сборкой Хальбаха;
3 – двойной ротор; 4 – вал; 5 – подшипники; 6 – корпус

Тип намотки определяет следующий уровень классификации дисковых ЭМ. Для дисковых машин доступны два типа намотки: барабанная (рисунок 1.3, а) и кольцевая, также называемая тороидальной (рисунок 1.3, б). Барабанная намотка может быть как с зубцовыми, так и с распределенными обмотками. Кольцевые намотки используются только для конструкций с двойным ротором.

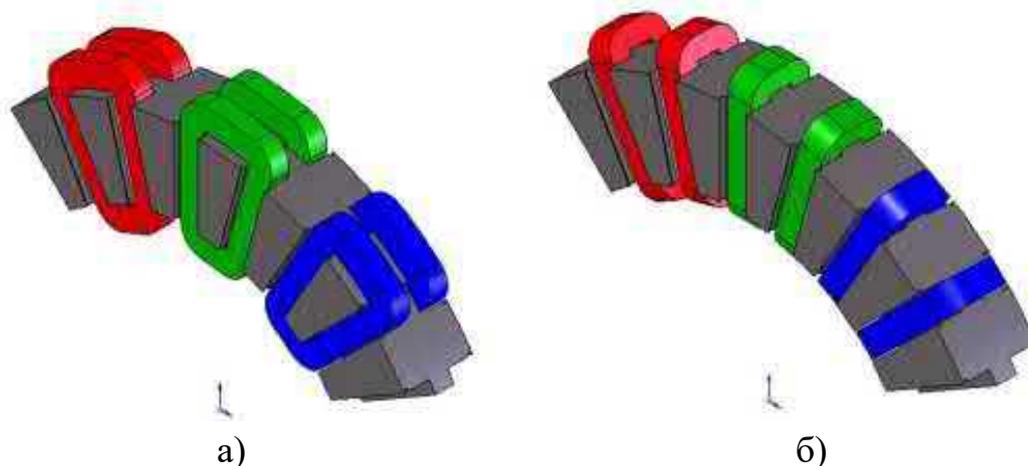


Рисунок 1.3 – Типы намоток

а) барабанная (зубцовая); б) кольцевая

Следующий уровень классификации дисковых ЭМ основан на полярности противоположно расположенных постоянных магнитов в конструкциях с двойным ротором. Противоположно расположенные магниты могут иметь одинаковую и разноименную полярность. При двойном роторе и магнитах одинаковой полярности (рисунок 1.5, а) конструкция статора имеет ярмо для замыкания магнитного потока, а при разноименной полярности магнитов (рисунок 1.5, б) ярмо можно значительно уменьшить или вовсе исключить, что приведет к безъярмовой и сегментированной конструкции статора дисковой ЭМ (рисунок 1.6). Форма ПМ в дисковых ЭМ, как правило, имеет трапецевидную, круглую или полукруглую форму (рисунок 1.4). Форма ПМ, а также расстояния между соседними магнитами влияют на распределение магнитного поля в воздушном зазоре и содержание высших пространственных гармоник.

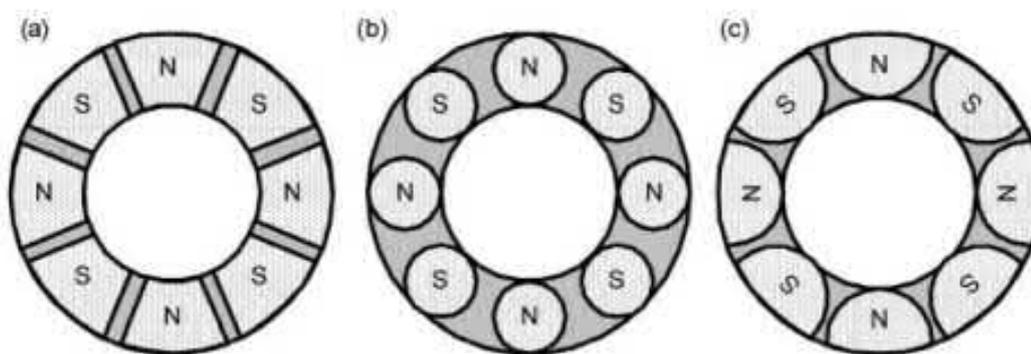


Рисунок 1.4 – Формы ПМ в дисковых ЭМ:

а) трапецеидальная; б) круглая; в) полукруглая

В отличие от других конструкций дисковых ЭМ, в безъярмовой сегментированной конструкции каждый сегмент статора (зубец) имеет намотанную на него катушку. При таком подходе проводники катушки могут быть прямоугольного поперечного сечения, что позволяет достичь высокого коэффициента заполнения паза.

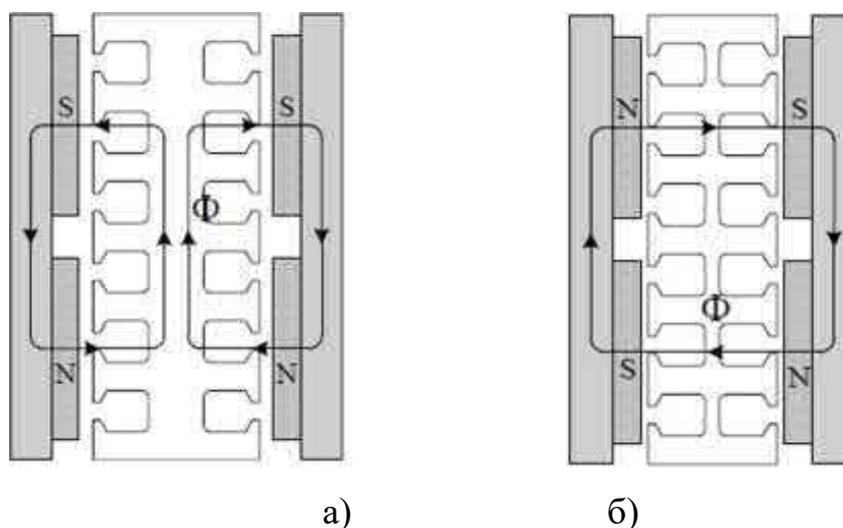


Рисунок 1.5 – Полярности противоположно расположенных постоянных магнитов:

а) магниты одинаковой полярности; б) магниты разноименной полярности

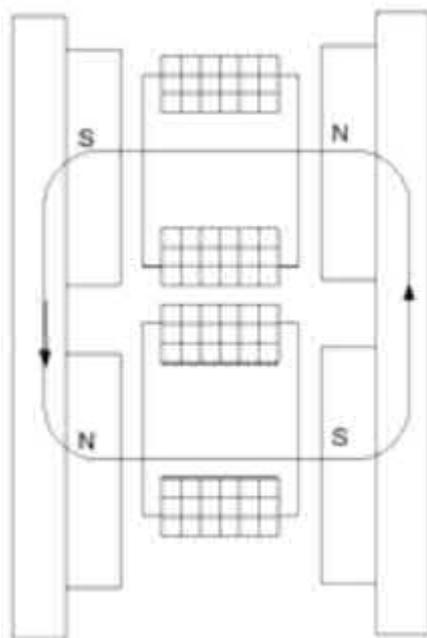


Рисунок 1.6 – Безъярмовая сегментированная конструкция статора дисковой ЭМ

Многоступенчатые (рисунок 1.7) машины создаются путем увеличения числа роторов и статоров двухсторонних машин. Многоступенчатые машины позволяют снять ограничение на увеличение выходной мощности дисковой машины, которое может быть достигнуто путем увеличения диаметра.

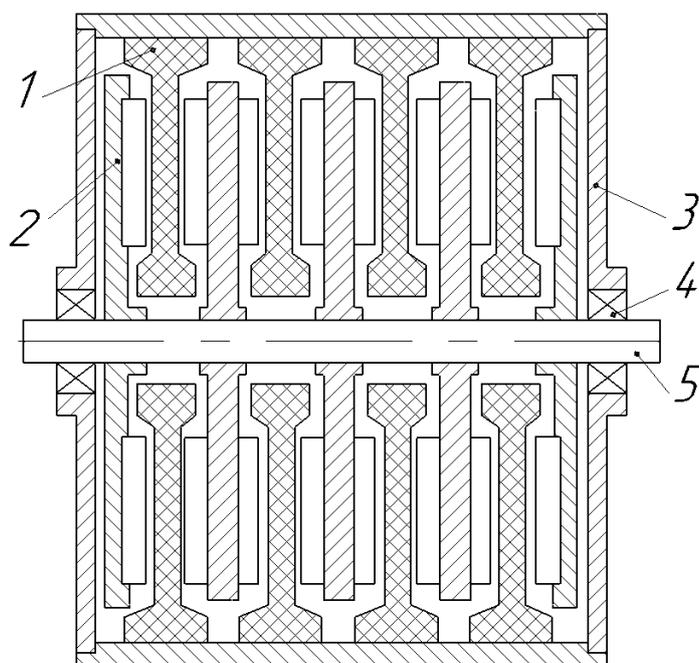


Рисунок 1.7 – Многоступенчатая дисковая машина:

1 – обмотка статора; 2 – роторный узел; 3 – корпус; 4 – подшипники; 5 – вал

В представленной классификации приведены наиболее распространенные конструкции дисковых ЭМ. Другие вариации конструкций достигаются изменением отдельных элементов: формы постоянных магнитов, магнитопровода статора, магнитопровода ротора, схемы обмотки. Конструкция дисковой ЭМ также во многом определяется используемыми активными материалами.

1.2.2 Примеры использования дисковых ЭМ в авиационной отрасли

Дисковые электрические машины в авиации применяются в качестве электродвигателей и генераторов различных прототипов гибридных и электрических силовых установок летательных аппаратов. В *Launchpoint Technologies* [45] разработаны дисковые электрические машины для гибридных силовых установок беспилотных летательных аппаратов, для привода колес шасси, а также для электрического привода хвостового винта для вертолета *Bell 206A/B* (рисунок 1.8). Данные дисковые электрические машины работают в диапазоне частот вращения от 2500 до 12000 об/мин и обладают удельной мощностью до 8,2 кВт/кг благодаря конструкции на основе двойных роторов со сборкой Хальбаха и безжелезного статора. При этом дисковые двигатели охлаждаются воздухом и создают собственный поток воздуха, поэтому не требуют дополнительной системы охлаждения или вентилятора.

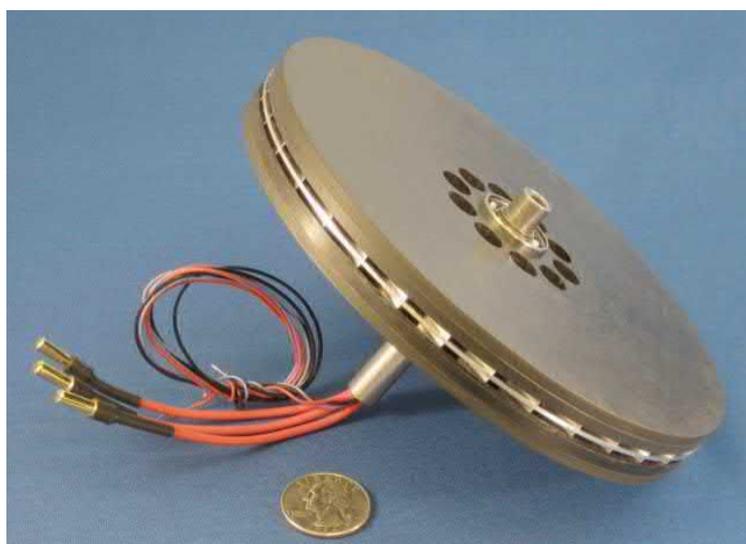


Рисунок 1.8 – Дисковые электродвигатели *Launchpoint Technologies*

Дисковые электродвигатели компании *Emrax* (рисунок 1.9) [46] имеют конструкцию с двумя роторами и зубцовым статором без ярма, расположенным между ними, что позволяет развивать высокий крутящий момент и высокую мощность во всем диапазоне частот вращения. Данные электродвигатели применяются в приводах воздушных винтов электрических планеров: электрического планера *Apis EA2*, двухместного планера *Electric Taurus*, самолета-планера *Alexander Schleicher GmbH*, планера *DG Flugzeugbau GmbH*, планера *Binder Flugmotoren & Flugzeugbau GmbH*. Кроме того, дисковые электродвигатели *Emrax* установлены на самолет *Eurosportaircraft* и на двигательную установку самолета *Efesto*. Данные двигатели имеют удельную мощность до 9 кВт/кг при мощности до 380 кВт с диапазоном частот вращения от 1840 до 4000 об/мин при жидкостном охлаждении, однако имеется возможность работы также при воздушном охлаждении. Два двигателя *Emrax* одинакового размера могут быть объединены друг с другом для повышения мощности и крутящего момента.



Рисунок 1.9 – Дисковый электродвигатель *Emrax*

Компании *YASA* [47] и *Magnax* [48] также имеют конструкцию с двумя роторами и зубцовым статором без ярма, расположенным между ними. Широкий интерес к данной конструкции обусловлен простой технологией сборки статора и

эффективной системой охлаждения. Дисковые электродвигатели *YASA* (рисунок 1.10) и *Magnax* (рисунок 1.11) применяются для гибридных электрических систем летательных аппаратов. В данных решениях дисковый двигатель с удельной мощностью до 10 кВт/кг при мощности до 300 кВт используется для обеспечения функций генерирования электроэнергии на борту, а также в качестве электродвигателя в составе системы ГСУ.



Рисунок 1.10 – Дисковый электродвигатель *YASA*



Рисунок 1.11 – Дисковый электродвигатель *Magnax*

Анализ публикаций показывает, что дисковые двигатели находят все более широкое применение в качестве электрического тягового привода летательных

аппаратов [49], привода хвостового винта вертолета [50], электрических приводов шасси [51], а также для привода беспилотных летательных аппаратов [52].

Представленные дисковые ЭМ уже широко используются в авиационной отрасли. При этом они являются коммерческими продуктами с серийным выпуском, а не отдельными исследовательскими проектами. Как видно, в авиационной отрасли дисковые ЭМ с высокими удельными характеристиками применяются в основном в качестве привода воздушного винта и тягового привода. При этом наиболее перспективными являются безжелезные дисковые ЭМ благодаря высокой удельной мощности и возможности создания эффективного воздушного охлаждения.

1.3 Материалы для дисковых электрических машин

1.3.1 Традиционные материалы

В электрических машинах чаще всего встречаются три типа материалов: магнитные, электрические и конструкционные. Для каждого типа материала существуют варианты с различными характеристиками. Ниже приводится обзор этих типов материалов, а также краткое описание их наиболее важных свойств.

1.3.1.1 Постоянные магниты

Постоянные магниты имеют высокую плотность магнитного поля и действуют как источники магнитного потока, используемого для возбуждения ЭМ. Величина магнитного потока зависит от ряда факторов:

- магнитная проницаемость;
- остаточная магнитная индукция;
- коэрцитивная сила;
- рабочая температура.

В основном используются два типа ПМ:

- сплавы с неодимом, железом и бором (NdFeB): характеризуются высокой остаточной магнитной индукцией B_r (и высокой коэрцитивной силой H);

– самарий-кобальтовые сплавы (SmCo): известны своей низкой чувствительностью к температурам и высокими максимальными рабочими температурами.

В таблице 1.4 приведены основные свойства ПМ и типовые значения магнитных характеристик.

Таблица 1.4 – Основные свойства ПМ и типовые значения

Материал	Остаточная магнитная индукция B_r , Тл	Максимальная рабочая температура, °С	Температурный коэффициент по остаточной магнитной индукции, %/°С	Плотность, кг/м ³
NdFeB	1,1-1,4	50-230	0,12	7600
SmCo	0,9-1,1	250-350	0,035	8300

Магниты из NdFeB имеют наивысшие значения остаточной магнитной индукции, но при этом обладают низкими максимальными рабочими температурами и требуют мер защиты от коррозии и окисления. Кроме того, поскольку температурный коэффициент по остаточной магнитной индукции материала NdFeB более чем в три раза больше, чем у материалов SmCo, изменение характеристик материала NdFeB с повышением температуры более выражено. В связи с этим необходимо принимать меры по регулированию температуры магнитов из NdFeB. Постоянные магниты из NdFeB на 10% легче, чем ПМ из SmCo, и в совокупности с высокими энергетическими характеристиками NdFeB делает их наиболее энергоёмкими, но только при невысоких максимальных рабочих температурах и изменениях температуры.

1.3.1.2 Сердечник ротора

Магнитные цепи роторов дисковых ЭМ могут быть выполнены в виде:

- магнитопроводящих колец или дисков, которые служат ярмом;
- ПМ, объединенных в магнитную сборку Хальбаха (рисунок 1.12) без сердечника.

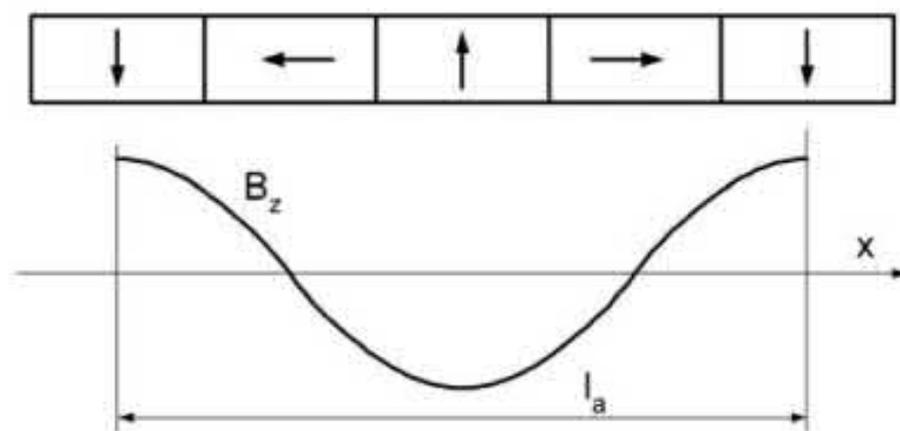


Рисунок 1.12 – Магнитная сборка Хальбаха

Поскольку магнитный поток в магнитной цепи ротора неподвижен, в качестве материала для магнитопроводящего ярма можно использовать углеродистые стали или при высоких механических нагрузках магнитопроводящие нержавеющие стали (к примеру, марки 30ХГСА).

Магнитная цепь ротора, состоящая из магнитной сборки Хальбаха, имеет следующие преимущества:

- величина магнитного потока на рабочей стороне массива до 1,5 раз выше по сравнению с традиционным ротором;
- массиву Хальбаха не требуется магнитопроводящего ярма для замыкания магнитного потока, что значительно снижает массу ротора;
- магнитное поле более синусоидальное (особенно в случае, когда угол между векторами намагниченности между соседними магнитами составляет 60° или 45° (рисунок 1.13)) по сравнению с традиционным ротором.

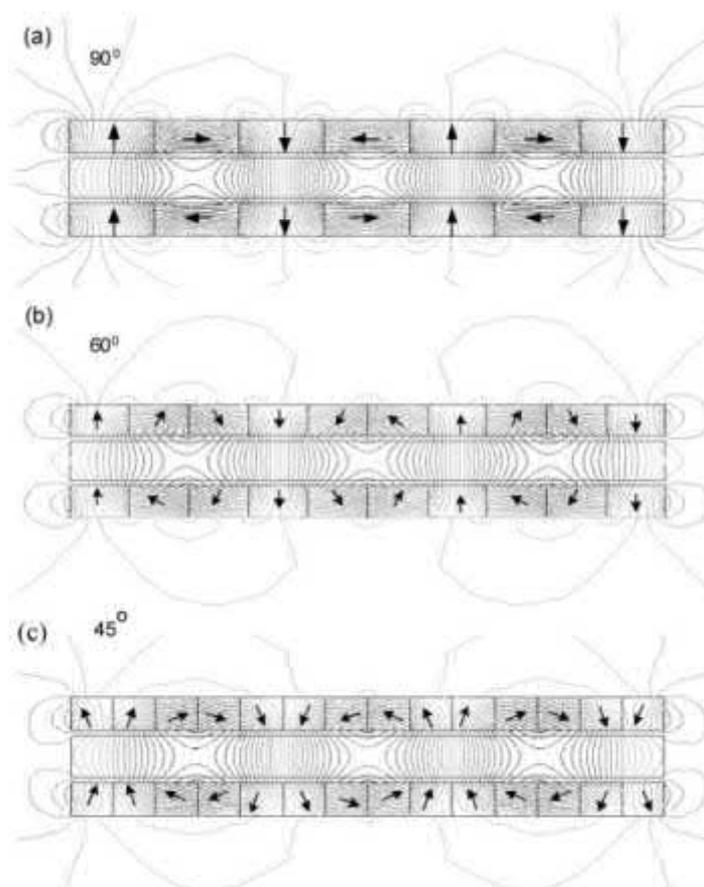


Рисунок 1.13 – Угол между векторами намагниченности в магнитной сборке Хальбаха между соседними магнитами:

а) 90° ; б) 60° ; в) 45°

1.3.1.3 Сердечник статора

Магнитомягкие материалы обладают высокой магнитной проницаемостью, которая необходима для направления магнитного потока без значительных потерь магнитодвижущей силы. Таким образом, магнитодвижущая сила может быть сконцентрирована в воздушном зазоре для создания высокой плотности магнитной индукции. Величина индукции в материале статора ограничена величиной индукции насыщения материала. Следовательно, величину максимального магнитного потока определяет поперечное сечение материала. Потери в стали зависят от состава используемого материала и толщины листов в шихтованном магнитопроводе.

Существуют два основных типа магнитомягких материалов (таблица 1.5), используемых в сердечниках статоров:

- кремниевая сталь марок 2421, 2413, М350 и др. (SiFe);
- кобальтовая сталь марок 49К2ФА, *Vacoflux 50* (CoFe).

Использование кобальтовой стали наиболее распространено в авиационной отрасли. На рисунке 1.14 показаны кривые намагничивания для кремниевой и кобальтовой сталей.

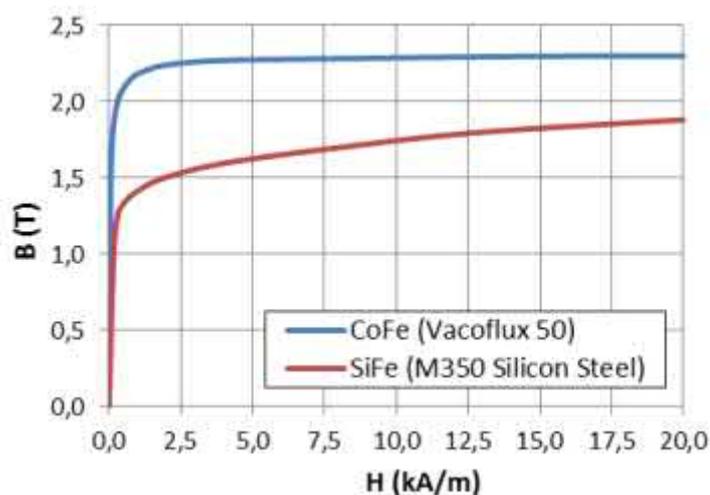


Рисунок 1.14 – Кривые намагничивания для кремниевой и кобальтовой сталей

Таблица 1.5 – Характеристики электротехнических сталей

Материал	Индукция насыщения, Тл	Плотность, кг/м ³
SiFe	1,6-1,8	7650
CoFe	2,2-2,35	8120

Кобальтовая сталь, имеющая в среднем на 30% большую индукцию насыщения, позволяет изготавливать ЭМ с меньшей массой. Несмотря на повышенную плотность кобальтовой стали на 4% в сравнении с кремниевой сталью, общая масса ЭМ для одинаковых конструкций снижается до 25%.

1.3.1.4 Обмотки

Для обмоток применяются электропроводящие материалы. Чем ниже удельное сопротивление проводника обмотки, тем ниже тепловые потери, но при этом удельное сопротивление увеличивается вместе с повышением температуры, что в свою очередь еще больше увеличивает потери.

Для проводников обмоток ЭМ медь является наиболее распространенным материалом из-за низкого удельного сопротивления и высокой теплопроводности, однако при этом медь имеет высокую плотность. В связи с этим в качестве проводников обмоток ЭМ также рассматривается алюминий. Алюминий имеет более высокое удельное сопротивление, чем медь, что в некоторой степени компенсируется его более низкой плотностью. В таблице 1.6 представлены основные свойства материала проводника и типовые значения.

Таблица 1.6 – Основные свойства материала проводника и типовые значения

Материал	Удельное сопротивление при 20 °С, Ом мм	Температурный коэффициент удельного сопротивления, 1/С	Максимальная рабочая температура, °С	Плотность, кг/м ³
Медь	$1,68 \cdot 10^{-5}$	0,00386	180	8900
Алюминий	$2,82 \cdot 10^{-5}$	0,0039	500	2700

Из таблицы 1.6 видно, что алюминий имеет большее удельное сопротивление, чем медь (на 67%), меньшую плотность (на 30%), а также гораздо более высокую максимальную рабочую температуру. Однако алюминиевые проводники не находят такого же широкого применения, как медные, из-за низкой технологичности укладки в пазы и низких прочностных характеристик. Кроме того, из-за высокого удельного сопротивления алюминиевые проводники используются с большим поперечным сечением по сравнению с медью, что ведет к необходимости увеличения размеров паза и, соответственно, габаритов ЭМ.

1.3.1.5 Конструкционные материалы

Механические нагрузки, воспринимаемые электрической машиной, требуют наличия жестких опор во избежание деформации и изгиба активных частей. Механическая нагрузка, которую конструкционный материал может выдержать без необратимой пластической деформации, определяется пределом текучести при растяжении. Также механическая нагрузка, при которой конструкционный

материал разрушается, определяется пределом прочности на разрыв. В качестве альтернативы в условиях циклической нагрузки предел прочности заменяется пределом выносливости. Предел выносливости определяется как процент от предельной прочности. Этот процент всегда меньше предела текучести материала.

Кроме того, важным свойством конструкционного материала является модуль Юнга (модуль упругости). Он характеризует степень деформации, которой подвергается материал при нагрузке, и определяет жесткость конструкции: чем выше значение модуля Юнга, тем жестче конструкция и тем меньше деформация материала. В таблице 1.7 приведены основные характеристики наиболее распространенных конструкционных материалов.

Таблица 1.7 – Характеристики конструкционных материалов

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Предел прочности на разрыв, МПа	Плотность, кг/м ³
Алюминий	70	150-420	2700
Титан	100-115	900-1000	4500
Нержавеющая сталь	190-210	500-1200	8000

В авиационной отрасли наибольшее распространение получили материалы, имеющие высокое отношение прочности к массе. Эта характеристика является наиболее важным определяющим фактором, чем затраты на сырье и производство.

1.3.2 Анализ перспективных материалов для дисковых электрических машин

1.3.2.1 Электрические машины из композитных материалов

Развитие электрических, тепловых и механических свойств композитных материалов (КМ) открывает новые возможности для замены металлических узлов при создании электрических машин. Низкая плотность большинства КМ по сравнению с традиционными материалами позволяет снизить их удельную массу, а также повысить технологичность за счет минимальной механической обработки и возможности создания деталей готовой формы. Исследования по применению КМ в отдельных узлах ЭМ показали возможности минимизации материалоемкости, повышения плотности энергии и энергоэффективности [53-55].

1.3.2.2 Использование КМ в качестве конструктивных узлов ЭМ

В настоящее время для конструктивных узлов используются титан, нержавеющая сталь, алюминий и др. Вместе с тем постепенно на замену данным материалам приходят КМ [56]: армированный углеродным волокном пластик (CFRP) и армированный арамидным волокном пластик (AFRP) [57, 58].

Как видно из таблицы 1.8, КМ не уступают по прочностным характеристикам металлическим сплавам. Также КМ обладают более низкой плотностью, что приводит к снижению суммарной массы ЭМ.

Таблица 1.8 – КМ в качестве конструктивных узлов ЭМ

Параметр	AFRP DW 152	CFRP DW 231	CFRP DW260	Inconel 718	Титан ВТ 22
Предел прочности, МПа	1880	2420	2420	1443	1191-1225
Плотность, кг/м ³	1330	1520	1520	8190	4600
Максимальная рабочая температура, °С	<140	<140	>300	>700	480
Коэффициент теплового расширения	0,2	0,2	0,2	9,5	7,7

При изготовлении валов и корпусов КМ используются менее активно, хотя первые идеи об использовании КМ для вала и корпуса ЭМ были высказаны еще в 1997 году в патентах [59, 60]. В работе [61] описана возможная технология изготовления вала ЭМ из углеродного волокна. Аналогичные идеи приведены в работах [62, 63].

Для создания деталей сложной формы, с металлической арматурой и с изотопными прочностными характеристиками используются стекловолокниты АГ-4В, а также ДСВ (дозированные стекловолокниты), которые применяют для изготовления силовых электротехнических деталей и деталей машиностроения [64]. Кроме того, пресс-материал АГ-4В широко используется для создания деталей методом литья и прессования под давлением.

Ограниченное использование КМ для изготовления вала ЭМ обусловлено тем, что КМ имеют недостаточную жесткость и не обладают магнитными свойствами. Поэтому для использования КМ при изготовлении вала ЭМ в работе [65] предложен сборный вал, представляющий собой комбинацию втулки из КМ и магнитопроводящих участков. Подобный подход обеспечивает необходимую жесткость вала, сохраняя при этом его магнитные свойства. Испытания данного вала в составе ЭМ позволили подтвердить его жесткость и необходимый ресурс. Важно отметить, что использование вала из КМ позволяет уменьшить массу ЭМ на 1-3 % (в зависимости от геометрических размеров ротора).

1.3.2.3 Использование КМ для систем охлаждения

КМ, помимо высоких прочностных характеристик, могут также обладать высокой теплопроводностью. При этом технология изготовления деталей из композитных материалов позволяет создавать элементы сложной формы, например спиралей, трубок нецилиндрической формы и т.д. Именно из-за этих свойств КМ в ряде исследовательских работ доказывается эффективность использования КМ для изготовления систем охлаждения ЭМ.

Так, в работе [66] приведена система охлаждения ЭМ, выполненная из трубок из КМ *Araldite CW 5725*. Данные трубки напечатаны на 3D-принтере и устанавливаются непосредственно в паз ЭМ. С помощью подобной системы охлаждения удалось реализовать электродвигатель мощностью 70 кВт с частотой вращения ротора 15000 об/мин при массе 14 кг. Важно отметить, что технология печати на 3D-принтере является менее материалоемкой и практически безотходной по сравнению с традиционной технологией изготовления рубашек охлаждения. Это обеспечивает, помимо прочего, экономическую эффективность использования КМ в системах охлаждения.

В работе [67] предложено использование КМ для формирования системы «полупогружного» охлаждения магнитоэлектрического стартер-генератора мощностью 45 кВт с частотой вращения ротора 32000 об/мин. Исследовательский коллектив *University of Nottingham* предлагает использовать КМ в данной системе

охлаждения в качестве материала для разделительной трубы между статором и ротором. Показано, что наиболее эффективным для данной цели является использование *E-Glass Fiber* с толщиной стенки 1 мм. Использование данной системы охлаждения позволило создать стартер-генератор с удельной мощностью 10-16 кВт/кг [68].

В работе [69] представлены исследования использования КМ для охлаждения ЭМ с постоянными магнитами мощностью 1 кВт. В предлагаемой системе охлаждения лобовые части залиты эпоксидной смолой с высокой теплопроводностью.

1.3.2.4 Использование композитных материалов в качестве материала статора электрических машин

Одной из перспективных технологий изготовления магнитопроводов статора является метод порошковой металлургии из магнитомягких КМ. Магнитомягкие композитные материалы (например, известная на рынке марка *Somalloy*) представляют собой прессованный порошок изолированных частиц железа.

Основными преимуществами магнитомягких КМ являются более низкая плотность материала в сравнении с традиционными кремниевыми сталями, а также возможность изготовления элементов сложной формы. В работах [70, 71] предлагается использование 3D-принтера для изготовления статоров ЭМ. В работе [72] описаны свойства магнитомягких КМ, используемых для создания индукторных электродвигателей. В [73] также приведен ряд маломощных электродвигателей, изготовленных с помощью магнитомягкого КМ.

Для минимизации потерь в сердечнике на высоких частотах кремниевые электротехнические стали заменяют аморфными магнитными сплавами. Ленты из аморфных сплавов на основе сплавов железа, никеля и кобальта получают путем быстрого затвердевания расплавленных металлов при высоких скоростях охлаждения. В результате получается металлический сплав со стекловидной структурой.

Применение лент из аморфных сплавов в массовом производстве электрических машин ограничивается их недостаточной механической прочностью. Однако в настоящее время разработаны методы обработки аморфных сплавов, к примеру, в [74-76] описываются технологии изготовления сборных магнитопроводов из аморфного железа.

1.3.2.5 Использование композитных материалов для изготовления обмоток электрических машин

Одним из перспективных направлений использования КМ в ЭМ является применение КМ для изготовления проводящих элементов ЭМ (обмотки статора и ротора, выводных жил и т.д.). В частности, известна работа коллектива Lappeenranta University Technology (LUT) [77], посвященная созданию проводников на основе углеродных нанотрубок (УНТ). Сейчас провода из УНТ имеют электрическую проводимость ниже, чем у меди, но исследования, проведенные в LUT, показали, что проводимость УНТ в будущем может быть выше, чем у меди, в 3 раза.

При этом важно отметить, что плотность провода из УНТ составляет 1,8-2 г/см³, что в 4 раза меньше, чем у медного провода [78]. Теплопроводность провода из УНТ составляет 300 Вт/м·°К (на 30% выше, чем у медных проводников), и его использование позволяет более эффективно отводить выделяемые тепловые потери. При одновременном применении описанных выше систем охлаждения из КМ в ряде случаев провод из УНТ уже может являться конкурентным решением при создании ЭМ с максимальной плотностью энергии, а также при создании высоковольтных ЭМ.

Также к преимуществам проводов из УНТ относится их очень маленький диаметр, что практически позволяет разрешить проблему вихревых токов и скин-эффекта в высокооборотных и сверхвысокооборотных ЭМ. Провода из УНТ являются более температуростойкими в сравнении с медью и имеют более низкий температурный коэффициент сопротивления. Сопротивления провода из УНТ при 100° С и при комнатной температуре практически одинаковы.

1.3.2.6 Использование композитных материалов для создания постоянных магнитов

КМ также находят применение при создании постоянных магнитов. Они используются при изготовлении магнитопластов или полимерных постоянных магнитов (ППМ), которые обладают более простой технологией производства. Промышленностью уже активно выпускаются ППМ, например марки MQ1-12, MQ1-10 [79].

Недостатком ППМ являются их более низкие энергетические характеристики по сравнению с традиционными постоянными магнитами. В таблице 1.9 приведено сравнение свойств ППМ и высококоэрцитивных постоянных магнитов на примере NdFeB.

Таблица 1.9 – Сравнительный анализ постоянных магнитов

	B_r , Тл	H_c , кА/м	BH , МГсЭ	Рабочая температура	Плотность, г/см ³
NdFeB	1,2	900–945	38	120	7,4
ППМ	0,78	945–1119	14–16	120–150	6,2

Как видно из таблицы 1.9, магнитные свойства ППМ значительно уступают магнитным свойствам NdFeB. Основным достоинством ППМ является их простая технология изготовления, которая не требует высокотемпературной обработки (в отличие от традиционных постоянных магнитов), а следовательно, более низкая цена производства. В ряде работ (в частности, [80]) уже рассматривается возможность изготовления ППМ с помощью 3D-принтера, что является весьма перспективным при решении задачи удешевления ППМ. Другим достоинством ППМ является возможность создания цельных магнитных сборок с оптимальной намагниченностью, например магнитных систем Хальбаха. На данном этапе ППМ находят широкое применение в общепромышленных ЭМ, где не требуется высокой плотности энергии.

Современные исследования [81-83] показывают, что при создании ЭМ, полностью состоящей из КМ, достигается снижение полной массы ЭМ. Применение КМ в качестве обмоток статора позволяет более эффективно отводить

тепловые потери. При этом ЭМ, состоящие из КМ, обладают меньшим КПД, чем ЭМ с традиционными материалами; кроме того, применение КМ накладывает ограничения на характеристики ЭМ. Помимо снижения КПД это ведет к увеличению объема используемых КМ, в частности обмоток и постоянных магнитов, для обеспечения требуемых электромагнитных нагрузок. Также низкая теплопроводность многих КМ требует специальных мер по отводу тепла. Однако при всем этом применение КМ в узлах ЭМ имеет перспективы, а создание полностью композитных ЭМ может стать привлекательной альтернативой в будущем.

Выводы к главе 1

Проведенный обзор ЭМ с высокими удельными характеристиками для летательных аппаратов позволяет определить ключевые вопросы, стоящие перед ЭМ для авиационной отрасли:

1. К современным ЭМ предъявляются высокие требования по удельной мощности и энергоэффективности, поскольку оба этих показателя оказывают значительное влияние на удельный расход топлива в ГСУ и расход заряда аккумулятора в ЭСУ. Таким образом, технологии ЭМ для авиационной отрасли нацелены на повышение удельной мощности и энергоэффективности каждого из элементов силовой установки ЛА.

2. Электрические машины с высокими удельными характеристиками мощностью более 100 кВт в основном имеют жидкостное охлаждение, а ЭМ менее 100 кВт – воздушное охлаждение. В низкоскоростных ЭМ наиболее часто применяются зубцовые обмотки, а в высокоскоростных машинах – распределенные обмотки для снижения высших пространственных гармоник. Все высокоэффективные ЭМ: радиальные с внутренним и внешним ротором, а также дисковые ЭМ – используют постоянные магниты (ПМ).

3. Из обзора электротехнических и конструкционных материалов, а также композитных материалов (КМ) установлено, что низкая плотность большинства КМ по сравнению с традиционными материалами позволяет снизить массу

активных частей ЭМ, а также повысить технологичность за счет минимальной механической обработки и возможности создания деталей готовой формы. Однако низкие электромагнитные характеристики большинства КМ приводят к увеличению габаритов ЭМ в сравнении с ЭМ из традиционных материалов.

4. Определена перспективность применения дисковых ЭМ в ЛА. Дисковые ЭМ позволяют наиболее рационально использовать ограниченное пространство в местах установки на летательных аппаратах. Малая осевая длина дисковых электродвигателей позволяет интегрировать их напрямую с приводом без риска увеличения габаритов летательного аппарата.

5. Представлена конструкция дисковой электрической машины без металлического сердечника статора. В таком типе электрической машины обмотка статора удерживается на немагнитном основании и располагается в воздушном зазоре между двумя роторами дискового типа. Использование массива Хальбаха на дисковом роторе позволяет отказаться от ярма для прохождения магнитного потока и заменить его материалом с низкой плотностью. Все это в целом позволяет снизить конечную массу дискового двигателя, что является критичным для авиационной отрасли.

ГЛАВА 2. ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИСКОВЫХ ЭМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В научных работах можно найти описание различных методов аналитического проектирования [84-87]. Некоторые из них используются для расчетов с целью получения начального приближенного решения. Другие являются более точными и основаны на магнитных цепях с сосредоточенными параметрами, которые могут учитывать 3D-геометрию.

Цель аналитического расчета состоит в том, чтобы ускорить процесс проектирования и получить наиболее точное решение с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Поскольку выполнить полный и точный аналитический расчет довольно сложно по причине ограничений и допущений, принятых в математических моделях, и отсутствия эмпирических коэффициентов, аналитический расчет используется для расчета начальных значений. В целом проектирование представляет собой итеративный процесс, который может повторяться несколько раз, прежде чем будет достигнуто удовлетворительное решение.

2.1 Определение крутящего момента

Геометрия дисковых электрических машин с осевым магнитным потоком и постоянными магнитами описывается в цилиндрической системе координат, показанной на рисунке 2.1. Ось машины расположена по оси z , а вращающиеся части вокруг оси z – в направлении $\pm\theta$. Осевая длина располагается в направлении z . Параметры ЭМ описываются в радиальном направлении, т.е. в направлении от оси z , параллельно плоскости xu .

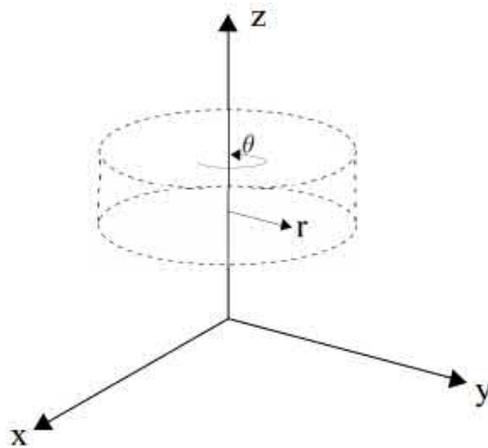


Рисунок 2.1 – Машина с осевым потоком в цилиндрической системе координат

Электродинамический момент в электрической машине может быть получен из уравнения силы Лоренца [88, 89]. Это сила, действующая на заряд q , который движется со скоростью v в магнитном поле B :

$$F_q = q(v \times B). \quad (1)$$

Если в проводнике движутся несколько зарядов, уравнение (1) можно переписать как

$$dF = Idl \times B, \quad (2)$$

где dF – сила, действующая на бесконечно малый отрезок линии dl , по которому течет ток I , в магнитном поле B (рисунок 2.2, а).

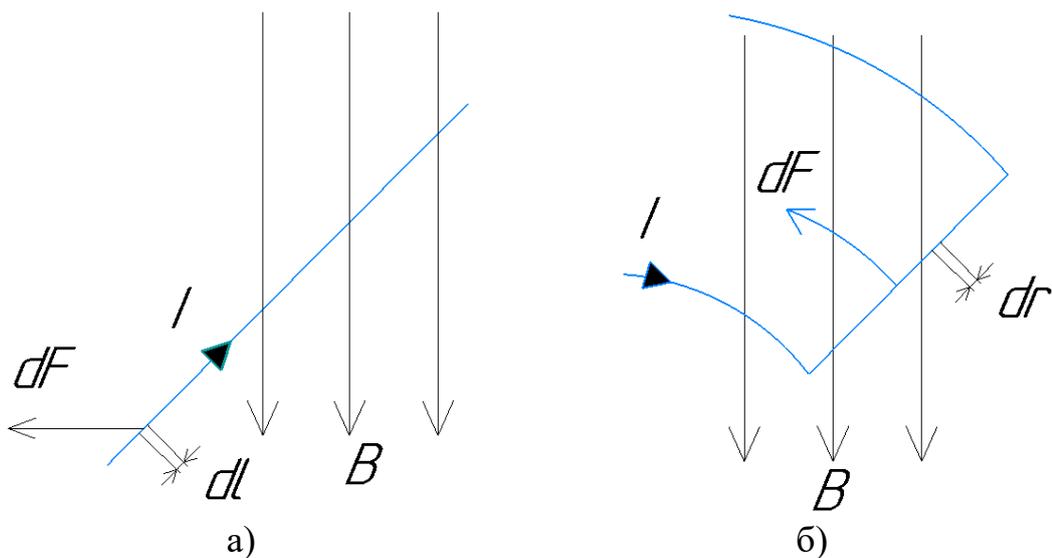


Рисунок 2.2 – Сила, действующая на токопроводящие проводники

в магнитном поле

Геометрия сегмента проводника в дисковой электрической машине с осевым магнитным потоком показана на рисунке 2.2, б. Магнитное поле в воздушном зазоре B ориентировано в осевом направлении и принимается постоянным. Тогда уравнение (2) можно переписать как

$$dF_{\theta} = I dr \times B . \quad (3)$$

Следовательно, крутящий момент на каждом сегменте проводника равен

$$dM_{\theta} = r dF_{\theta} = r I dr \cdot B , \quad (4)$$

где r – расстояние от оси z .

Линейная токовая нагрузка, которая определяется как сумма токов во всех проводниках, раскинутых по окружности радиусом r :

$$A(r) = \frac{m_1 N_{\phi} I_{\phi}}{\pi r} , \quad (5)$$

где m_1 – количество фаз, N_{ϕ} – количество проводников в каждой фазе, а I_{ϕ} – фазный ток.

Если выражения (4) и (5) проинтегрировать от внутреннего радиуса, $R_{внут} = D_{внут} / 2$, до внешнего радиуса, $R_{внеш} = D_{внеш} / 2$ по r , то суммарный средний крутящий момент от одного дискового ротора составит:

$$M_{cp} = \frac{1}{4} m_1 N_{\phi} k_{об} B_{cp} D_{внеш}^2 (1 - \lambda^2) I_{\phi} , \quad (6)$$

где B_{cp} – средняя индукция в воздушном зазоре, $k_{об}$ – обмоточный коэффициент основной гармоники, а λ – соотношение внешнего и внутреннего диаметров $\lambda = D_{внут} / D_{внеш}$.

Другой распространенный подход к расчету крутящего момента в дисковой ЭМ, показанный в [88, 89], заключается в умножении магнитной B_{cp} и линейной токовой нагрузки $A(r)$ на активную поверхность S . Для двухсторонней машины $S = 2\pi (R_{внеш}^2 - R_{внут}^2)$ и, следовательно, средний электромагнитный момент:

$$M_{cp} = 2\pi B_{cp} A(r = R_{внут}) (R_{внеш}^2 - R_{внут}^2) R_{внут} , \quad (7)$$

что также можно записать как

$$M_{cp} = 2\pi B_{cp} A(r = R_{внут}) R_{внеш}^3 (\lambda - \lambda^3) . \quad (8)$$

Взяв из уравнения (8) первую производную по λ и приравняв ее нулю, можно увидеть, что максимальный крутящий момент может быть достигнут при $\lambda = 1/\sqrt{3}$.

На основе анализа литературных источников [90-93] было установлено, что выражение для крутящего момента, приведенное в уравнении (7), обладает наибольшей сходимостью с результатами численных расчетов МКЭ.

2.2 Ограничивающие факторы

В общем случае выходная мощность ЭМ ограничена тепловым состоянием и тесно связана с охлаждением. Большинство ЭМ способны переносить кратковременные перегрузки, которые могут в несколько раз превышать номинальную выходную мощность. ПМ и изоляционные материалы обмоток являются чувствительными к высокой температуре, так как постоянные магниты могут размагничиваться из-за повышения температуры, а изоляционные материалы – терять свои диэлектрические свойства.

Одними из параметров, влияющих на тепловое состояние ЭМ, являются линейная токовая нагрузка и плотность тока. Поэтому при проектировании следует руководствоваться типовыми значениями для магнитных и электрических нагрузок, которые широко представлены в литературных источниках [94, 95]. Типовые диапазоны электрических и магнитных нагрузок приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Типовые значения для магнитных и электрических нагрузок

Параметр	Величина
Средняя индукция в воздушном зазоре (беспазовая конструкция статора), Тл	0,5-0,6
Средняя индукция в воздушном зазоре (пазовая конструкция статора), Тл	0,65-0,75
Средняя линейная токовая нагрузка (при жидкостном охлаждении), кА/м	48-80
Средняя линейная токовая нагрузка (при воздушном охлаждении), кА/м	16-32
Плотность тока в проводниках обмотки (при жидкостном охлаждении), А/мм ²	10-12

Плотность тока в проводниках обмотки (при воздушном охлаждении), А/мм ²	4-6
--	-----

Другим ограничивающим фактором являются механические факторы, так как компоненты электромагнитной цепи машины часто должны также обеспечивать механическую прочность конструкции машины. Таким образом, оптимизация электромагнитной цепи часто может приводить к теоретически верной геометрии, которая малоприспособна или не имеет практического применения.

2.3 Характеристики дисковой ЭМ в dq-системе координат

Характеристики дисковой электрической машины можно получить, исходя из эквивалентной схемы синхронной машины с постоянными магнитами, описанной в dq системе координат.

Выражения для d- и q-компонентов фазного напряжения имеют следующий вид:

$$u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q, \quad (9)$$

$$u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_m, \quad (10)$$

где R – фазное сопротивление, L_d и L_q – индуктивности по продольной и поперечной осям соответственно, i_d и i_q – токи по продольной и поперечной осям соответственно, ω – угловая частота, ψ_m – потокосцепление постоянного магнита.

Амплитуда фазного напряжения рассчитывается как

$$u = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}, \quad (11)$$

d- и q-составляющие тока можно использовать для расчета амплитуды фазного тока:

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}. \quad (12)$$

Электродинамический крутящий момент можно выразить как:

$$M = \psi_m i_q + (L_d - L_q) i_q i_d. \quad (13)$$

Поскольку L_d и L_q в дисковой ЭМ предполагаются равными ($L_d = L_q = L$), то коэффициент реактивного крутящего момента равен нулю. Тогда оставшаяся часть крутящего момента пропорциональна q -составляющей тока i_q и выражается как

$$M = \psi_m i_q. \quad (14)$$

На рисунке 2.3 показана механическая характеристика дисковой ЭМ. Согласно данной кривой в области постоянного крутящего момента $i_q = i_{ном}$ и $i_d = 0$. Для увеличения частоты вращения в области ненормального режима со снижением крутящего момента необходимо приложить отрицательную d -составляющую тока для ослабления магнитного потока.

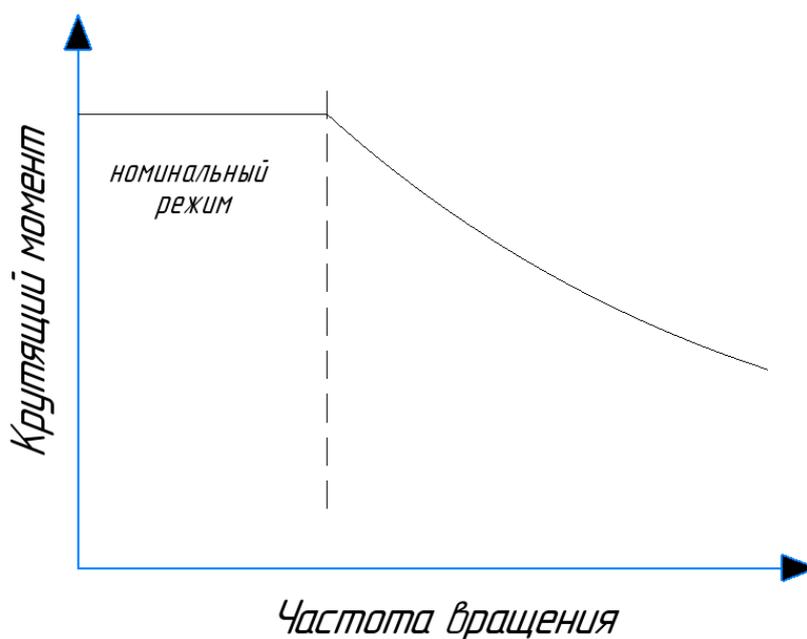


Рисунок 2.3 – Механическая характеристика дисковой ЭМ

2.4 Число пар полюсов и число пазов статора

Для увеличения потокосцепления общее количество полюсов $2p$ должно быть как можно ближе к числу пазов статора z . Допустимые комбинации числа пазов и полюсов обычно описываются формулами:

$$z = 2p \pm 1, \quad (15)$$

$$z = 2p \pm 2, \quad (16)$$

где число пазов z должно делиться на 3 для трехфазной машины.

Для безжелезной конструкции дисковой ЭМ также применяется термин «число пазов статора», что в данном случае определяет число сегментов (зубцов) статора.

Возможные комбинации числа пар полюсов (до $p = 16$), полученные из уравнений (15) и (16), перечислены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Комбинации числа пазов и пар полюсов в трехфазной ЭМ

Число пар полюсов, p	$z = 2p \pm 1$	$z = 2p \pm 2$
1	3	–
2	3	6
4	9	6
5	9	12
7	15	12
8	15	18
10	21	18
11	21	24
13	27	24
14	27	30
16	33	30

Использование комбинации $z = 2p \pm 1$ приводит к нечетному количеству катушек на фазу, что ограничивает возможности последовательного и параллельного соединения катушек. Все комбинации $z = 2p \pm 2$ дают четное число катушек на фазу. Следовательно, катушки могут быть соединены как последовательно, так и параллельно.

Выбор числа пар полюсов основан на величине частоты перемагничивания:

$$f = \frac{pn}{60}, \quad (17)$$

где p – количество пар полюсов (целое число, кратное двум); n – частота вращения ротора (об/мин).

Чем больше частота перемагничивания, тем выше потери на вихревые токи в магнитопроводах, бандажах роторов, ПМ и проводниках обмотки статора. Количество пар полюсов p следует выбирать с учетом нескольких аспектов. Большое число пар полюсов дает:

– более плавный крутящий момент;

– более высокий обмоточный коэффициент.

С другой стороны, количество пар полюсов ограничено:

– частотой коммутации и коммутационными потерями;

– увеличенными потерями на вихревые токи;

– рассеянием магнитного потока.

2.5 Обмотка статора и обмоточный коэффициент

Типы обмоток статора [96-98]:

– распределенная обмотка (обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу);

– дробно-щелевая обмотка либо дробная обмотка (обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу);

– зубцовая обмотка (разновидность дробно-щелевой обмотки, с дробным числом пазов на полюс и фазу и укороченным шагом обмотки, равным -1).

По количеству слоев в пазу обмотка разделяется на однослойную и двухслойную.

При однослойной обмотке в каждом пазу находится одна сторона катушки. Количество всех катушек равно $z/2$, а количество катушек на фазу равно $N_{\kappa 1} = z/2m_1$ где z – число пазов статора, а m_1 – количество фаз.

В двухслойной обмотке в каждом пазу размещаются две стороны разных катушек. Количество всех катушек равно z , а количество катушек на фазу равно $N_{\kappa 2} = z/m_1$. Число пазов на полюс и фазу для однослойной и двухслойной обмоток:

$$q = \frac{z}{2pm_1}. \quad (18)$$

Число проводников в катушке для однослойной обмотки:

$$w_{\kappa 1} = \frac{N_{\phi} \cdot a}{N_{\kappa 1}}. \quad (19)$$

Число проводников в катушке для двухслойной обмотки:

$$w_{\kappa 2} = \frac{N_{\phi} \cdot a}{N_{\kappa 2}}, \quad (20)$$

где N_{ϕ} – число витков в фазе, a – число параллельных ветвей.

Для зубцовой обмотки внешняя ширина $\tau_{внеш}$ и внутренняя ширина $\tau_{внут}$ катушки определяются согласно формулам:

$$\tau_{внеш} = \frac{\pi D_{внеш}}{z}, \quad (21)$$

$$\tau_{внут} = \frac{\pi D_{внут}}{z}. \quad (22)$$

Поперечное сечение катушки показано на рисунке 2.6.

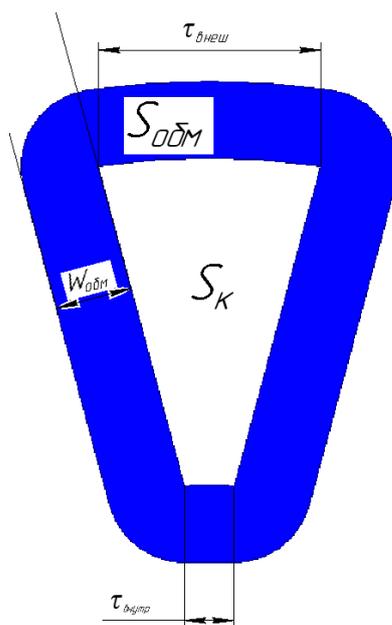


Рисунок 2.4 – Поперечное сечение катушки

Площадь поперечного сечения катушки $S_{к}$ определяется исходя из осевой длины воздушного зазора ($R_{внеш} - R_{внут}$), внешней $\tau_{внеш}$ и внутренней $\tau_{внут}$ ширины катушки.

Соотношение между шириной обмотки $W_{обм}$ и площадью медной обмотки $S_{обм}$, видимой в осевом направлении на рисунке 2.6, можно принять:

$$S_{обм} = \left(2(R_{внеш} - R_{внут}) + \left(\frac{\pi D_{внеш}}{2p} - 2W_{обм} \right) + \left(\frac{\pi D_{внут}}{2p} - 2W_{обм} \right) \right) W_{обм}. \quad (23)$$

Тогда площадь поперечного сечения катушки $S_{к}$ и площадь обмотки $S_{обм}$ должны быть выбраны так, чтобы соответствовать площади воздушного зазора

$S_{зазора} = \pi (R_{внеш}^2 - R_{внут}^2)$ дисковой ЭМ:

$$\frac{S_{\text{зазора}}}{z} = S_{\kappa} + S_{\text{обм}}. \quad (24)$$

Обмоточный коэффициент определяется как коэффициент распределения, умноженный на коэффициент шага обмотки:

$$k_{\text{об}} = k_p k_{\text{ш}}. \quad (25)$$

Как коэффициент распределения, так и коэффициент шага обмотки зависят от типа используемой обмотки. Коэффициент распределения:

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{2m_1}\right)}{z \sin\left(\frac{k\pi}{2m_1 n}\right)}, \quad (26)$$

где k – номер гармоники, m_1 – количество фаз и n – количество катушек в группе.

Количество катушек в группе можно рассчитать как:

$$n = \frac{z}{m_1 F}, \quad (27)$$

где F – наибольший общий делитель числа полюсов $2p$ и числа пазов статора z .

Коэффициент шага обмотки можно рассчитать согласно формуле:

$$k_{pn} = \sin\left(\frac{k\pi p}{z}\right). \quad (28)$$

Обмоточные коэффициенты для возможных комбинаций z/p (до 24/13) показаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Обмоточные коэффициенты (гармоники 1-13)

z/p	Номер гармоники												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
6/2	0,866	0,866	0	-0,866	-0,866	0	0,866	0,866	0	-0,866	-0,866	0	0,866
6/4	0,866	-0,866	0	0,866	-0,866	0	0,866	-0,866	0	0,866	-0,866	0	0,866
12/5	0,933	0,433	-0,500	-0,433	0,067	0	-0,067	0,433	0,500	-0,433	-0,933	0	0,933
12/7	0,933	-0,433	-0,500	0,433	0,067	0	-0,067	-0,433	0,500	0,433	-0,933	0	0,933
18/8	0,945	0,289	-0,577	-0,289	0,140	0	0,061	0,289	0	-0,289	-0,061	0	-0,140
18/10	0,945	-0,289	-0,577	0,289	0,140	0	0,061	-0,289	0	0,289	-0,061	0	-0,140
24/11	0,950	0,217	-0,604	-0,217	0,163	0	0,096	0,217	-0,104	-0,217	0,017	0	-0,017
24/13	0,950	-0,217	-0,604	0,217	0,163	0	0,096	-0,217	-0,0104	0,217	0,017	0	-0,017

2.6 Размеры постоянного магнита

Для синусоидального распределения магнитной индукции от ПМ в воздушном зазоре средняя индукция определяется через выражение

$$B_{cp} = \frac{2}{\pi} B_m, \quad (29)$$

где B_m – максимальная индукция в воздушном зазоре.

Для несинусоидального (трапецеидального) распределения магнитной индукции в воздушном зазоре средняя индукция определяется через выражение

$$B_{cp} = \alpha B_m, \quad (30)$$

где α – отношение ширины полюса $b_{ПМ}$ к полюсному делению $\tau_p = \frac{\pi D}{2p}$, то есть

данное отношение показывает, какую часть полюсного деления составляет ПМ.

На начальном этапе проектирования ЭМ распределение магнитной индукции в воздушном зазоре принимается прямоугольным и предполагается, что ПМ покрывают 120 электрических градусов, или $2/3$ полюсного деления.

Для сборки Хальбаха, приведенной на рисунке 2.5, максимальное значение магнитной индукции на активной поверхности определяется как

$$B_m = B_r \left(1 - e^{-\frac{2\pi h_{ПМ}}{\tau_p}} \right) \sin \left(\frac{\pi}{n_{ПМ}} \right), \quad (31)$$

где B_r – остаточная магнитная индукция ПМ, $h_{ПМ}$ – высота ПМ, τ_p – полюсное деление, $n_{ПМ}$ – число сегментов (ПМ) на полюсном делении сборки Хальбаха.

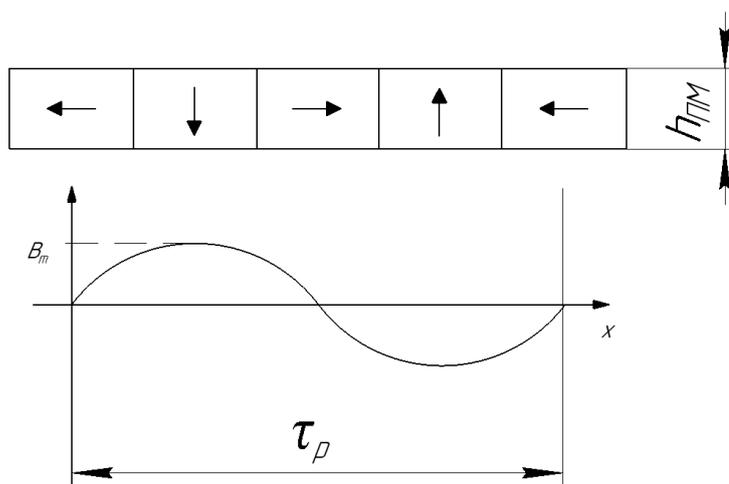


Рисунок 2.5 – Сборка Хальбаха

В воздушном зазоре между двумя обращенными друг к другу сборками Хальбаха, как показано на рисунке 2.6, мгновенное значение магнитной индукции в нормальном направлении составляет [99]:

$$B_z(x, z) = B_m \sin\left(\frac{2\pi x}{\tau_p}\right) \left(\frac{\cosh\left(\frac{2\pi z}{\tau_p}\right)}{\cosh\left(\frac{\pi\delta}{\tau_p}\right)} \right), \quad (32)$$

где δ – длина воздушного зазора. Для уравнения (32) система координат находится в центре воздушного зазора.

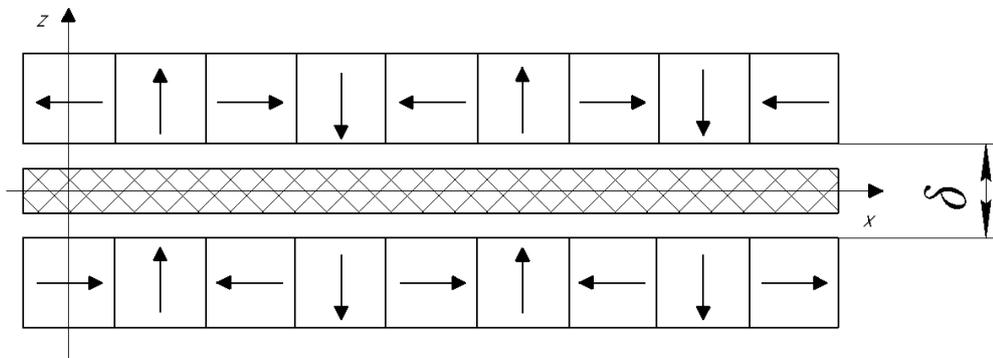


Рисунок 2.6 – Две обращенные друг к другу сборки Хальбаха

Магниты с аксиальной намагниченностью являются полюсными ПМ, а тангенциальные – вспомогательными. Увеличение количества сегментов ПМ от минимального числа $n_m = 4$ до 6 приводит к увеличению магнитной индукции в воздушном зазоре на 6%.

Внешняя ширина $W_{внеш}$ и внутренняя ширина $W_{внут}$ постоянного магнита в соответствии с рисунком 2.7 могут быть рассчитаны с использованием уравнений (33) и (34).

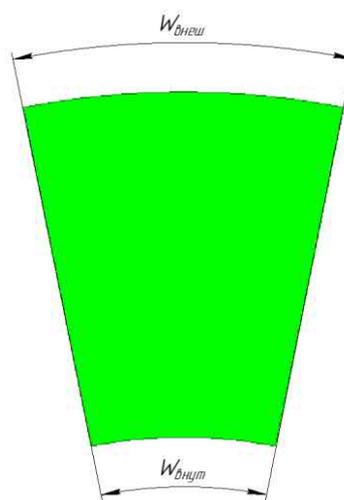


Рисунок 2.7 – Наружная и внутренняя ширина ПМ

$$W_{\text{внеш}} = \frac{\pi D_{\text{внеш}}}{2p} \alpha, \quad (33)$$

$$W_{\text{внут}} = \frac{\pi D_{\text{внут}}}{2p} \alpha, \quad (34)$$

где p – число пар полюсов, α – отношение ширины ПМ к величине полюсного деления.

Если пренебречь потоком рассеяния, общий магнитный поток воздушного зазора на полюс можно рассчитать, умножив среднюю магнитную индукцию воздушного зазора $B_{\text{ср}}$ на площадь постоянного магнита S_m , направленного к воздушному зазору:

$$\Phi_m = B_{\text{ср}} S_m = B_{\text{ср}} \pi \frac{R_{\text{внеш}}^2 - R_{\text{внут}}^2}{2p}. \quad (35)$$

На рисунке 2.8 приведена геометрия ПМ. Согласно рисунку 2.8 приближенный магнитный поток, создаваемый ПМ, можно принять как произведение остаточной магнитной индукции ПМ $B_{r, \text{ПМ}}$ и площади поперечного сечения ПМ в радиальном направлении:

$$\Phi_{\text{ПМ}} = B_{r, \text{ПМ}} S_{r, \text{ПМ}} = B_{r, \text{ПМ}} \cdot h_{\text{ПМ}} (R_{\text{внеш}} - R_{\text{внут}}). \quad (36)$$

Приравняв выражения (35) и (36), можно получить выражение для определения начальной высоты ПМ:

$$h_{\text{ПМ}} = \frac{B_{\text{ср}}}{B_{r, \text{ПМ}}} \frac{\alpha \pi}{2p} (R_{\text{внеш}} + R_{\text{внут}}). \quad (37)$$

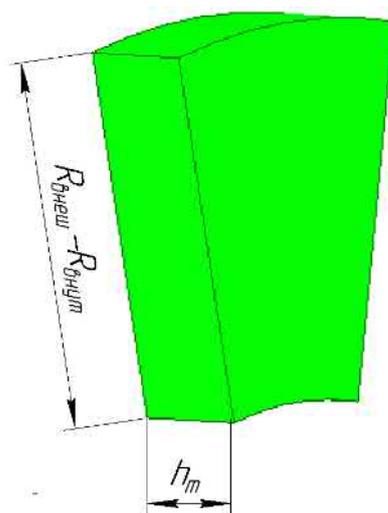


Рисунок 2.8 – Геометрия ПМ

Для создания малогабаритной ЭМ с высокой магнитной нагрузкой необходимо, чтобы воздушный зазор был как можно меньше, что позволит уменьшить осевую длину воздушного зазора.

Представленные выражения позволяют получить геометрические размеры и соотношения в дисковой ЭМ. Данные размеры и соотношения являются входными данными для построения компьютерной модели дисковой ЭМ в программных пакетах численного моделирования. Это позволяет перейти к точному моделированию с использованием численных компьютерных моделей.

Выводы к главе 2

1. Разработаны элементы методики проектирования дисковых электрических машин безжелезной конструкции. Установлено, что выражение для крутящего момента, в котором учитывается результат умножения площадей воздушного зазора на магнитную и линейную токовую нагрузки, дает хорошую сходимость с результатами численных расчетов.

2. Представлены рекомендации по выбору числа пар полюсов и числа сегментов статора. Общее количество полюсов $2p$ должно быть как можно ближе к числу пазов статора z , чтобы максимизировать потокосцепление. Преимуществами большого числа полюсов являются более плавный крутящий момент и более

высокий обмоточный коэффициент, однако есть и ограничение: электромагнитная частота, которая приводит к увеличенным потерям на вихревые токи и рассеяние магнитного потока.

3. Приведены выражения для определения геометрических размеров постоянных магнитов через величину магнитной индукции в воздушном зазоре и характеристики постоянных магнитов, а также размеров катушки статора и обмоточных данных. Описаны характеристики дисковой ЭМ в dq -системе координат.

4. Представленные выражения позволяют получить геометрические размеры и соотношения в дисковой ЭМ. Данные размеры и соотношения являются входными данными для построения компьютерной модели дисковой ЭМ в программных пакетах численного моделирования.

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В настоящее время благодаря развитию машиностроительной отрасли появилась возможность значительно увеличить показатели удельной мощности. Развитие программных пакетов компьютерного моделирования и технологии материалов, обладающих высокой температурной устойчивостью, изменило те ограничения, которые были наложены при проектировании ЭМ несколько десятилетий назад. По этой причине появляется возможность изменить подход к проектированию электрических машин, пересмотреть ограничивающие факторы и изучить влияние различных факторов на выходные характеристики исследуемых ЭМ.

В литературе недостаточно освещены вопросы формирования обличей дисковых ЭМ с возбуждением от постоянных магнитов, поэтому существует потребность провести исследование электромагнитных процессов в дисковых ЭМ в разных конструктивных исполнениях и определить наиболее эффективные варианты исполнения, позволяющие обеспечить максимально возможные энергетические характеристики при минимальной массе и габаритах.

3.1 Допущения при моделировании дисковых электрических машин

Из-за геометрических особенностей наиболее полно дисковые машины могут быть рассчитаны методами компьютерного моделирования только в трехмерной постановке. Это связано трехмерными (3D) эффектами: эффектом кривизны и краевым эффектом. Эффект кривизны – это зависимость распределения магнитного потока от геометрии паза, зубца и полюсного деления вдоль радиуса дисковой ЭМ. Краевой эффект – это искажение магнитного потока, которое возникает на внутреннем и внешнем радиусах дисковой ЭМ. Несмотря на высокую точность, получаемую с помощью трехмерного анализа методом конечных элементов, такое моделирование занимает слишком много времени, чтобы его можно было использовать при проектировании, в котором может быть включена

оптимизация с использованием множества критериев. Поэтому использование трехмерного анализа методом конечных элементов в данной работе ограничено.

В связи с вышеобозначенными трудностями трехмерного расчета довольно часто проводят моделирование дисковой ЭМ в двухмерной (2D) постановке. 2D-моделирование выполняется на среднем диаметре статора и ротора, что эквивалентно модели линейной машины с постоянными магнитами. Принцип преобразования трехмерной геометрии дисковой ЭМ в двухмерную геометрию представлен на рисунке 3.1: в трехмерной модели приведена цилиндрическая поверхность (1) среднего диаметра, в двухмерной модели развернутая плоскость (2) получается из цилиндрической поверхности (1). 2D-вычисления методом конечных элементов используют развернутую плоскость (2), которая рассматривается в декартовых координатах и может быть использована в большинстве программных пакетов.

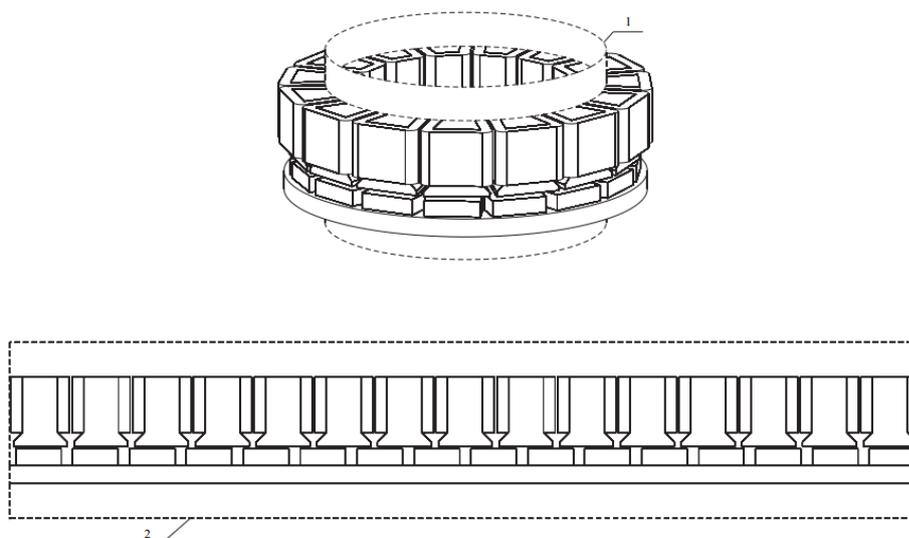


Рисунок 3.1 – Принцип преобразования трехмерной геометрии дисковой ЭМ в двумерную геометрию

Это позволяет повысить скорость расчетов в современных программных пакетах компьютерного моделирования, такие как *Ansys Electromagnetic Desktop*, позволяют проводить расчеты дисковых ЭМ в 2D-постановке без существенного снижения точности по сравнению с 3D-постановкой.

3.2 Исследование влияния материала сердечника статора на массу дисковой ЭМ

Характеристики современных ЭМ в большей степени ограничены характеристиками активных материалов. При этом важным параметром для авиационной отрасли является масса ЭМ. Согласно статистике, до 40% активной массы ЭМ составляет масса статора. В качестве материала сердечника статора используются кремниевые (2421) и кобальтовые (49К2ФА) электротехнические стали. Кобальтовые электротехнические стали обладают высокой индукцией насыщения, что позволяет уменьшить поперечные сечения элементов сердечника, однако при этом они обладают большей удельной массой (на 6,5%).

В данном исследовании приводится сравнение массогабаритных показателей дисковых ЭМ при различных материалах сердечника статора. В качестве материала сердечника статора выбраны электротехнические стали марок 2421 и 49К2ФА.

Конструкция исследуемой ЭМ представляет собой трехфазный дисковый электродвигатель с одним ротором и одним статором. Для оценки изменения массы статора ЭМ габаритные размеры оставались неизменными для обоих вариантов. Частота перемагничивания и электромагнитные нагрузки для рассматриваемых ЭМ также одинаковы для обоих вариантов.

Расчет дискового ЭД проведен методом конечных элементов в программном комплексе *Ansys Electronics Desktop* при номинальной мощности 300 кВт, напряжении питания 600 В, частоте вращения вала 6000 об/мин и жидкостном охлаждении. В таблице 3.1 приведены параметры дисковых ЭМ, полученные в ходе электромагнитного расчета.

Таблица 3.1 – Параметры дисковых ЭМ

Параметр	Значение	
	Сталь 2421; толщина листа 0,18 мм	Сталь 49К2ФА; толщина листа 0,2 мм
Материал сердечника статора	Сталь 2421; толщина листа 0,18 мм	Сталь 49К2ФА; толщина листа 0,2 мм
Частота вращения, об/мин	6000	
Напряжение питания, В	600	
Выходная мощность, кВт	300	
Момент на валу, Нм	477,5	477,5
Ток фазы, А	573	588

Плотность тока, А/мм ²	26,1	26,7
Линейная токовая нагрузка, кА/м	75,17	77,01
Тепловой фактор (Aj), А/см·А/мм ²	19620	20590
Частота перемагничивания, Гц	800	
Потери в обмотке при 180°C, Вт	8200	8313
Потери в стали статора, Вт	1410	765
Потери в стали ротора, Вт	30	25
Потери в постоянных магнитах, Вт	420	460
Суммарные потери, Вт	10060	9563
КПД электрической машины, %	96,7	96,9
Максимальная магнитная индукция в зубце под нагрузкой, Тл	1,6	2,05
Магнитная индукция в спинке статора под нагрузкой, Тл	1,65	2,04
Максимальная индукция в спинке ротора под нагрузкой, Тл	1,51	1,5
Максимальная индукция в воздушном зазоре под нагрузкой, Тл	0,52	0,53
Количество полюсов	16	
Количество пазов	48	
Тип обмотки	Распределенная однослойная	
Обмоточный коэффициент	1	
Количество витков в пазу	12	
Количество параллельных ветвей	4	
Количество жил в витке	7	
Диаметр жилы по меди/изоляции, мм	1/1,064	
Марка обмоточного провода, мм	ПНЭТ-имид	
Коэффициент заполнения паза	0,5	
Активное сопротивление при температуре 20°C, мОм	5,5	5,3
Индуктивность по поперечной оси (L_q), мкГн	45,5	39
Индуктивность по продольной оси (L_d), мкГн	45,5	39
Материал магнитопровода ротора	Сталь 30ХГСА	
Марка постоянных магнитов	<i>SmCo</i> , остаточная индукция 1,09 Тл, напряженность 764 кА/м	
Масса магнитопровода статора, кг	13,7	10,5
Масса магнитопровода ротора, кг	6,9	6,9
Масса обмотки, кг	4,2	4,2
Масса постоянных магнитов, кг	4,8	4,8
Масса активной части, кг	29,6	26,4
Тип охлаждения	Жидкостное охлаждение статора	
Осевая длина активной части, мм	75	71
Диаметр по лобовым, мм	470	
Внешний диаметр статора/ротора, мм	400	
Внутренний диаметр статора/ротора, мм	300	
Немагнитный зазор между статором и ротором, мм	2	
Толщина стакана, мм	1	

Воздушный зазор, мм	1
---------------------	---

Как видно из результатов, приведенных в таблице 11, при одинаковых габаритных размерах и обмоточных данных дисковых ЭМ масса сердечника статора при использовании кобальтовой электротехнической стали 49К2ФА снизилась на 23,3% в сравнении с кремниевой электротехнической сталью 2421. При этом осевая длина дисковой ЭМ при использовании кобальтовой стали 49К2ФА благодаря уменьшению поперечного сечения ярма сердечника статора уменьшилась на 5,3% в сравнении с кремниевой сталью 2421. Также в таблице 3.1 можно увидеть, что значения электромагнитных нагрузок, такие как линейная токовая нагрузка, плотность тока и индукция в воздушном зазоре, идентичны для дисковой ЭМ как с кобальтовой сталью 49К2ФА, так и кремниевой сталью 2421.

На рисунках 3.2, 3.3 представлены продольный и поперечный разрезы ЭД, на рисунке 3.4 – 3D-модель ЭД.

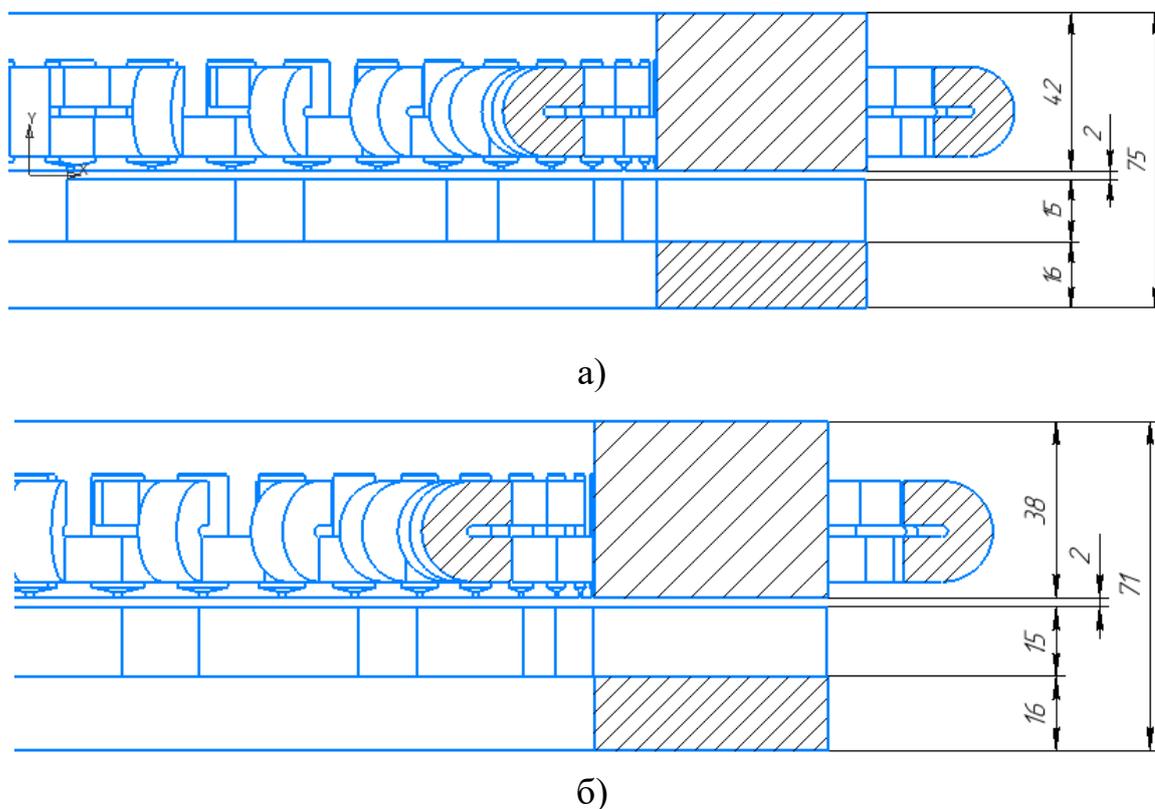


Рисунок 3.2 – Продольный разрез дисковой ЭМ:

а) сердечник статора из стали 2421; б) сердечник статора из стали 49К2ФА

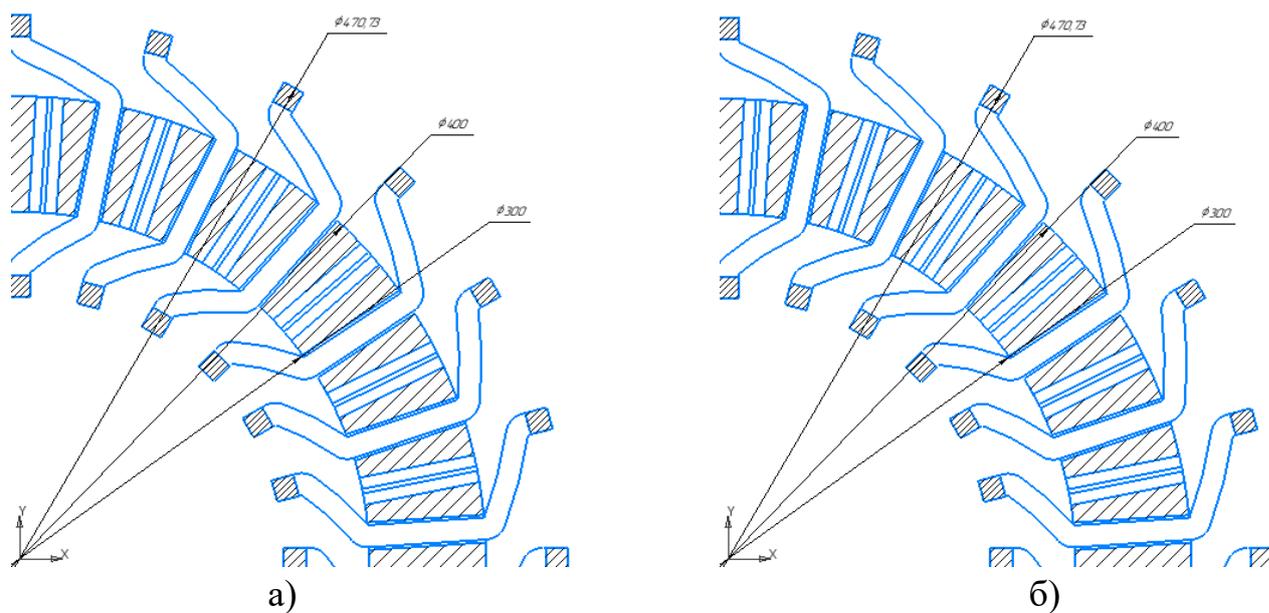


Рисунок 3.3 – Поперечный разрез дисковой ЭМ:

а) сердечник статора из стали 2421; б) сердечник статора из стали 49К2ФА

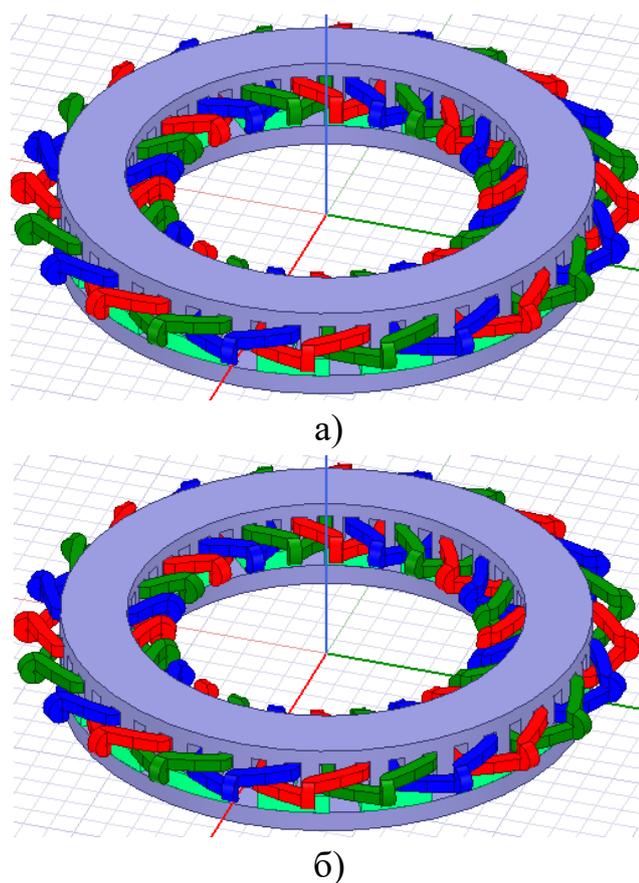


Рисунок 3.4 – 3D-модель дисковой ЭМ:

а) сердечник статора из стали 2421; б) сердечник статора из стали 49К2ФА

На рисунке 3.5 представлена схема соединения обмотки дисковой ЭМ.

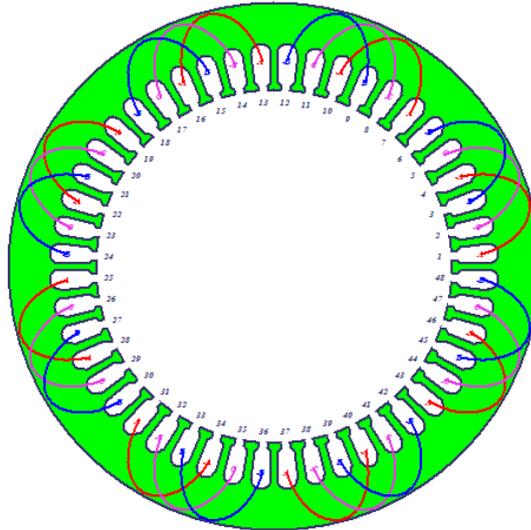


Рисунок 3.5 – Схема соединения обмоток статора дисковой ЭМ с сердечником статора из стали 2421 и 49К2ФА

На рисунке 3.6 представлены картины магнитной индукции в сечении на среднем диаметре дисковых ЭМ под нагрузкой.

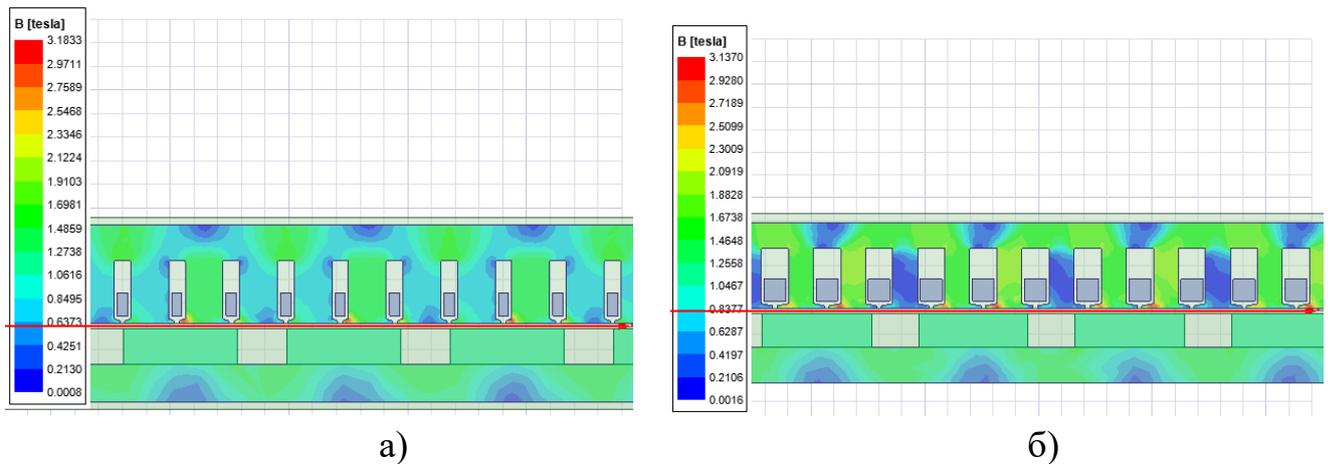
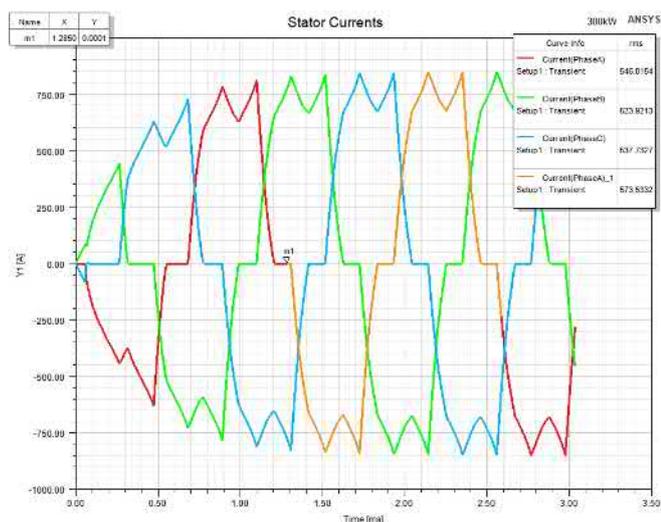


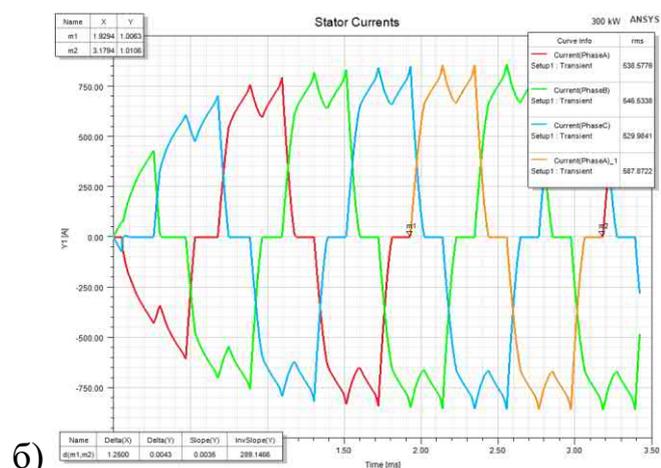
Рисунок 3.6 – Картины магнитной индукции дисковой ЭМ:
а) сердечник статора из стали 2421; б) сердечник статора из стали 49К2ФА

Из рисунка 3.6 видно, что значения магнитной индукции в ярме ротора одинаковы и равны 1,5 Тл. Значения магнитных индукций зубца и ярма статора для сердечника из стали 2421 составляют 1,6-1,65 Тл, для сердечника из стали 49К2ФА – 2-2,05 Тл. Данные величины магнитных индукций являются максимальными для каждого материала, и это свидетельствует о полном использовании активных материалов.

На рисунке 3.7 представлены фазные токи под нагрузкой.



а)



б)

Рисунок 3.7 – Фазные токи дисковой ЭМ:

а) сердечник статора из стали 2421; б) сердечник статора из стали 49К2ФА

Представленные результаты электромагнитных расчетов показывают, что дисковая ЭМ при одинаковых выходных параметрах, электромагнитных нагрузках и габаритных размерах с сердечником статора из кобальтовой стали 49К2ФА в сравнении с дисковой ЭМ с сердечником статора из кремниевой стали 2421 обладает меньшей массой (на 23,3%) и меньшей осевой длиной (на 5,3%) благодаря снижению поперечного сечения зубцов и ярма сердечника статора. Поэтому применение кобальтовых сталей в авиационной отрасли является наиболее целесообразным.

3.3 Исследование конструкций дисковых ЭМ

В ЭМ с обычным зубчатым статором потери в железе часто составляют значительную часть общих потерь. В некоторых машинах с ПМ зубцы статора укорачивают или вовсе исключают, чтобы уменьшить гармоники магнитодвижущей силы и потери в железе. В сэкономленном пространстве можно разместить больше проводников. Эта конструкция называется беспазовой, так как обмотка располагается в воздушном зазоре. Обмотку в воздушном зазоре часто изготавливают из лицендрата (пучок очень маленьких прядей проводников, скрученных вместе), чтобы уменьшить высокочастотные потери на вихревые токи в меди. Более низкие потери и более высокая электрическая нагрузка позволяют повысить удельную мощность.

Другой вариант ЭМ с ПМ – это магнитная система Хальбаха с ПМ на роторе. Магнитная система Хальбаха представляет собой конфигурацию, в которой некоторые магниты намагничены не только радиально, но и тангенциально. Эта конфигурация увеличивает общую магнитодвижущую силу (МДС) в цепи магнитного потока. Магнитная система Хальбаха может использоваться для поддержания магнитного потока на необходимом уровне даже при увеличении эквивалентного воздушного зазора. С магнитами, намагниченными в различных направлениях, железное ярмо в роторе также может быть исключено, что экономит вес.

Конструкции дисковых ЭМ с ПМ и аксиальным магнитным потоком имеют преимущества, такие как лучшее использование материала сердечника и пригодность для конструкций с большим числом полюсов.

Для определения исполнения с наименьшей массой были рассмотрены пять вариантов конструкций дисковой ЭМ:

- конструкция №1 с одним ротором и одним статором (рисунок 3.8);

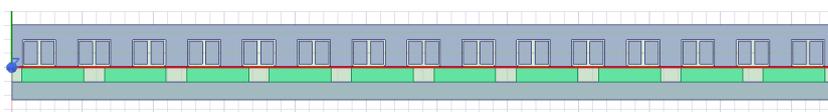


Рисунок 3.8 – Дисковая ЭМ с одним ротором и одним статором

– конструкция №2 с одним ротором со сборкой Хальбаха и одним статором (рисунок 3.9);

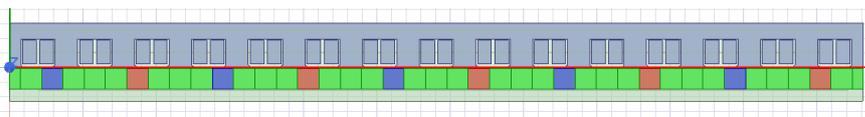


Рисунок 3.9 – Дисксовая ЭМ с одним ротором со сборкой Хальбаха и одним статором

– конструкция №3 с двумя роторами и сегментированным сердечником статора без ярма (рисунок 3.10);

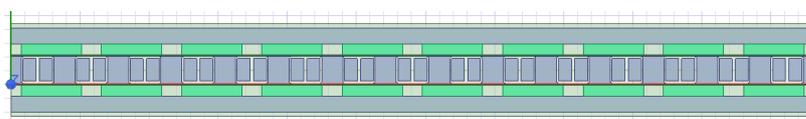


Рисунок 3.10 – Дисксовая ЭМ с двумя роторами и сегментированным сердечником статора без ярма

– конструкция №4 с двумя роторами со сборками Хальбаха и сегментированным сердечником статора без ярма (рисунок 3.11);



Рисунок 3.11 – Дисксовая ЭМ с двумя роторами со сборками Хальбаха и сегментированным сердечником статора без ярма

– конструкция №5 с двумя роторами со сборками Хальбаха и без сердечника статора (рисунок 3.12).

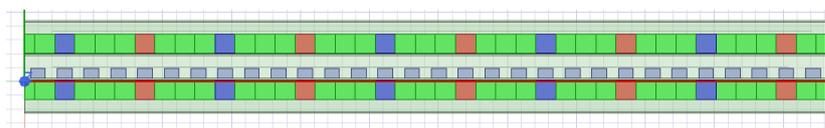


Рисунок 3.12 – Дисксовая ЭМ с двумя роторами со сборками Хальбаха и без сердечника статора

Электромагнитные расчеты вариантов дисковых ЭМ были проведены методом конечных элементов в программном комплексе *Ansys Electronics Desktop*.

Дисковые ЭМ были рассчитаны на выходную мощность 100 кВт и номинальную частоту вращения 3200 об/мин. Габаритные размеры, такие как внешние и внутренние диаметры рассматриваемых дисковых ЭМ, оставались одинаковыми. В таблице 3.2 приведены результаты электромагнитных расчетов конструкций дисковых ЭМ.

Таблица 3.2 – Сводные данные рассмотренных генераторов

	№1	№2	№3	№4	№5
Выходная мощность, кВт	100				
Частота, Гц	270				
Линейное напряжение, В	460				
Фазный ток, А	146	146	147	147	147
Количество полюсов/пазов статора	10/15				10/30
Тип обмотки	Зубцовая				Распределенная
Число слоев	2				1
Шаг катушки по пазам	1				4
Параллельные ветви	5				
Число витков в фазе	325				400
Число жил в проводнике	20				
Диаметр жилы, мм	0,5				
Обмоточный коэффициент	0,866	0,866	0,866	0,866	1
Плотность тока, А/мм ²	7,3	7,4	7,4	7,4	7,5
Линейная токовая нагрузка, А/м	48210	48990	48990	48990	47700
Активное сопротивление фазы при 20 °С, Ом	0,0212	0,0212	0,0212	0,0212	0,052
Индуктивность фазы общая по d/q-осям, мкГн	320	320	164	99,4	110,75
Магнитная индукция зубца статора, Тл	1,6	1,6	1,6	1,6	-
Магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
Потери в обмотке, Вт	1320	1360	1360	1360	1260
Потери в магнитопроводе статора, Вт	450	450	250	250	-
Потери на вихревые токи в постоянных магнитах, Вт	150	150	150	150	150
Добавочные потери, Вт	250	250	250	250	250
Общие электромагнитные потери, Вт	2170	2210	1700	1700	1660
КПД (электромагнитный, без учета механических потерь), %	97	97	97	97	98
Материал магнитопровода статора	Сталь 49К2ФА, толщина листа 0,2 мм				-

Марка постоянных магнитов	<i>SmCo</i> , остаточная индукция 1,051 Тл, напряженность 740 кА/м				
Масса активной части, кг	74	72	63,3	61,4	48,1
Внешний диаметр ротора, мм	450				
Внутренний диаметр ротора, мм	290				
Внешний диаметр статора, мм	450				
Внутренний диаметр статора, мм	290				
Осевая длина, мм	107	90,5	122	99,8	94
Высота ПМ, мм	20	28,5	16	27,9	27
Длина воздушного зазора, мм	2				

Односторонние конструкции дисковых ЭМ, представленные в вариантах 1 и 2, различаются магнитной системой ротора. В конструкции №1 ротор состоит из стандартной магнитной системы с чередующимися полюсами, а в конструкции №2 – из магнитной сборки Хальбаха. Как видно из таблицы 8, высота постоянных магнитов в конструкции №2 на 42,5% выше, чем в конструкции №1. Это обусловлено необходимостью получения высоких значений магнитной индукции в воздушном зазоре.

В вариантах конструкций №3, 4 и 5 двойные роторы дисковых ЭМ позволяют получить аналогичные односторонним конструкциям №1 и 2 выходные характеристики с меньшей массой активных частей, но за счет увеличения высоты ПМ, что необходимо для получения высоких значений магнитной индукции в воздушном зазоре.

Кроме того, в конструкциях с магнитными сборками Хальбаха индуктивности по продольной и поперечной осям снижены по сравнению с конструкциями с магнитопроводящим ярмом, что обусловлено снижением магнитной проводимости магнитной цепи ротора из-за отсутствия сердечника ротора.

Также из таблицы 12 видно, что применение магнитныхборок Хальбаха позволяет снизить общую массу активной части дисковых ЭМ в среднем на 2,7-3%. В данном случае такое небольшое снижение массы обусловлено тем, что плотность материала постоянного магнита из *SmCo* составляет 8300 кг/м³, а плотность магнитопровода ротора из стали 30ХГСА – 7800 кг/м³. В магнитной сборке

Хальбаха ПМ занимают весь объем ротора дисковой ЭМ и имеют увеличенную высоту по сравнению со стандартными магнитными системами. Данные факторы обуславливают такое небольшое снижение активной массы ЭМ. Исходя из этого, применение материала ПМ *NdFeB* позволит более заметно снизить активную массу дисковой ЭМ благодаря тому, что плотность данного материала составляет 7600 кг/м³.

Из результатов, представленных в таблице 12, варианты конструкций дисковых ЭМ выдают мощность 100 кВт при одинаковых габаритных размерах активных частей. При этом конструкция №5 обладает наименьшей массой активных частей в 48,1 кг, что меньше массы конструкции №1 на 35%, конструкции №2 – на 33%, конструкции №3 – на 24%, конструкции №4 – на 21%. Это позволяет сделать вывод о том, что безжелезные дисковые ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха имеют наибольшие значения удельной мощности при одинаковых габаритах и электромагнитных нагрузках.

3.4 Исследование компьютерной модели безжелезной дисковой электрической машины с параметрической оптимизацией размеров постоянных магнитов

3.4.1 Описание конструкции, исследуемой дисковой ЭМ

Для задач исследования рассмотрена двухсторонняя конструкция дисковой ЭМ с двумя внешними безжелезными роторами со сборками Хальбаха и безжелезным статором (рисунок 3.13). Для анализа параметров в программном комплексе Ansys Electronics Desktop разработана компьютерная модель дисковой ЭМ.

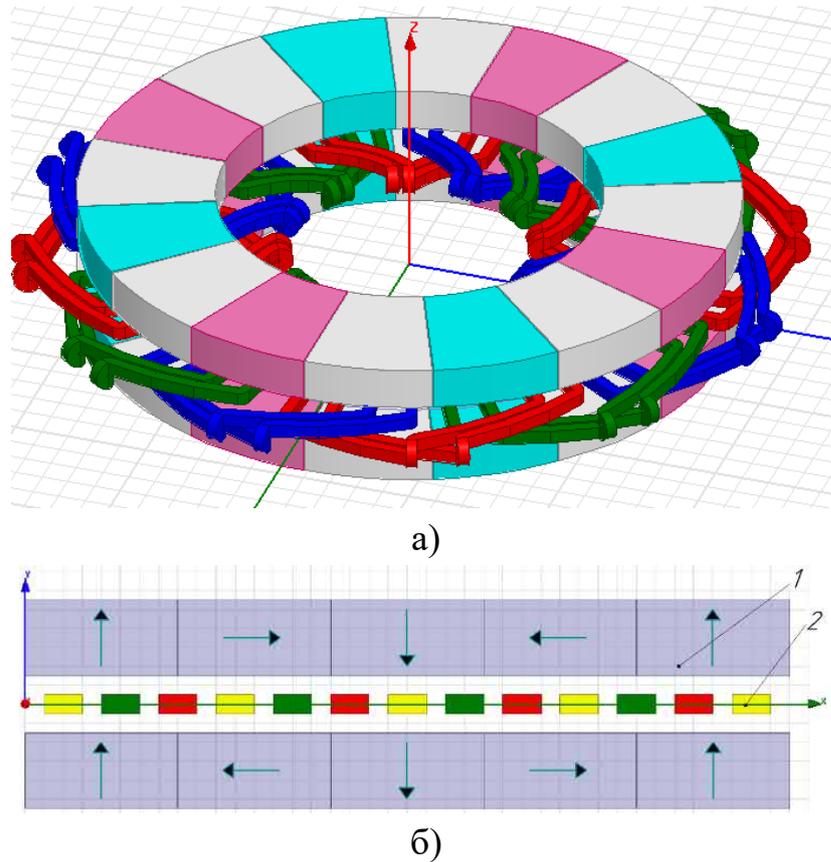


Рисунок 3.13 – Двухсторонняя конструкция дисковой ЭМ с двумя внешними безжелезными роторами со сборками Хальбаха и безжелезным статором:

а) трехмерная модель; б) двухмерная модель;

1 – ПМ; 2 – обмотки статора

3.4.2 Оценка влияния относительного углового размера тангенциально намагниченного постоянного магнита в сборке Хальбаха на характеристики дисковой ЭМ

Так как в массиве Хальбаха имеется только одна рабочая сторона с высоким значением магнитного поля, то очевидным становится исследование влияния вариации геометрических размеров ПМ на характеристики этого поля. С применением компьютерной модели, проведена параметрическая оптимизация энергетических параметров безжелезной дисковой ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха. На рисунке 3.14 изображен эскиз магнитной сборки Хальбаха.

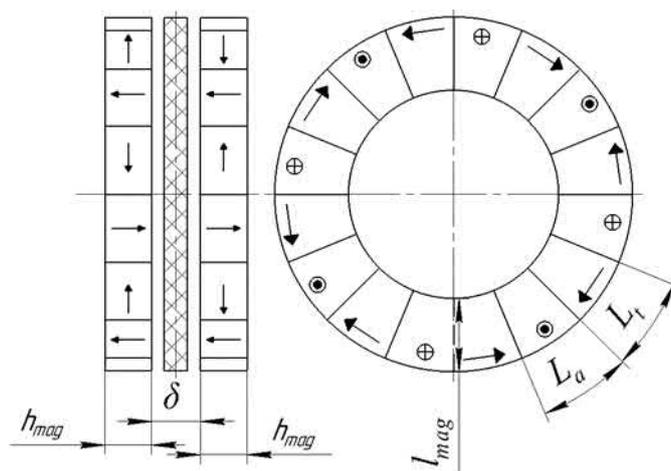


Рисунок 3.14 – Эскиз магнитной сборки Хальбаха

Конфигурация магнитной сборки Хальбаха определяет следующие энергетические характеристики дисковой ЭМ:

- величину магнитного потока в воздушном зазоре;
- синусоидальность магнитной индукции в воздушном зазоре.

Целью оптимизации является обеспечение максимального магнитного потока в воздушном зазоре при изменении угловых размеров ПМ (L_t , L_a) в магнитной сборке Хальбаха. Ограничениями выступают высота ПМ (h_{mag}), длина ПМ (l_{mag}) и величина воздушного зазора (δ). Критерием оптимизации выбрана максимальная индукция (B_m) в воздушном зазоре на холостом ходу, так как от данного параметра зависит электромагнитная мощность ЭМ.

Для оптимизации использовался метод упорядоченного перебора. Математическая формулировка задачи параметрической оптимизации выглядит следующим образом:

$$B_m^* = f(L_t^*) = \max, \text{ при } h_{mag} = const, l_{mag} = const, \delta = const. \quad (38)$$

где переменная L_t^* – относительный угловой размер тангенциально намагниченного ПМ:

$$L_t^* = L_t / L_{t0}, \quad (39)$$

где L_t – измененный угловой размер тангенциально намагниченного ПМ, L_{t0} – первоначальный угловой размер тангенциально намагниченного ПМ.

Изменение угловых размеров ПМ магнитной сборки Хальбаха приведено на рисунке 3.15.

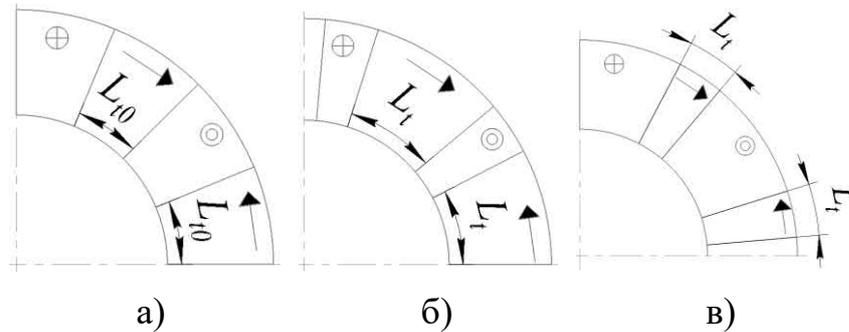


Рисунок 3.15 – Изменение угловых размеров ПМ магнитной сборки Хальбаха

а) $L_t^* = 1$; б) $L_t^* = 1,5$; в) $L_t^* = 0,5$

Относительный угловой размер аксиально намагниченного ПМ (L_a^*) изменяется пропорционально изменению углового размера тангенциально намагниченного ПМ, так, для магнитной сборки Хальбаха с двумя ПМ на полюс:

$$L_a^* = 2 - L_t^*, \quad (40)$$

Исследуемый параметр B_m^* – относительная величина максимальной индукции в воздушном зазоре:

$$B_m^* = B_m / B_{m0}, \quad (41)$$

где B_{m0} – величина максимальной индукции при L_{t0} , B_m – величина максимальной индукции при L_t .

В процессе решения параметрической задачи оптимизации получена зависимость относительной величины максимальной индукции в воздушном зазоре от относительного углового размера тангенциально намагниченных ПМ в магнитной сборке Хальбаха (рисунок 3.16)

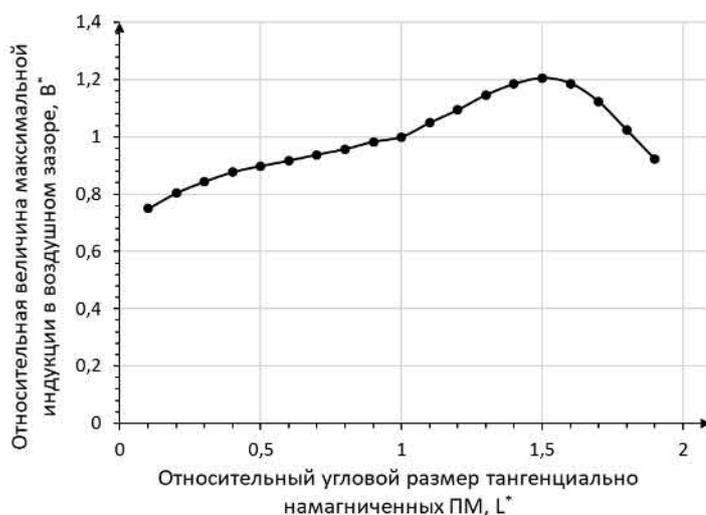


Рисунок 3.16 – Кривая зависимости относительной величины максимальной индукции в воздушном зазоре от относительного углового размера тангенциально намагниченных ПМ

Как видно из рисунка 3.16, увеличение углового размера тангенциально намагниченных ПМ ведет к росту величины максимальной индукции в воздушном зазоре на 20%. Однако увеличение углового размера тангенциально намагниченных ПМ более чем в 1,5 раза от начального углового размера приводит к снижению максимальной индукции в воздушном зазоре из-за увеличения потоков рассеяния между полюсами. Это позволяет сделать вывод о том, что варьирование угловых размеров ПМ позволяет повысить плотность магнитного потока в воздушном зазоре и, следовательно, увеличить энергетические характеристики дисковой ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха.

Выводы к главе 3

В данной главе рассмотрено компьютерное моделирование электромагнитных характеристик дисковых ЭМ в программном пакете Ansys Electromagnetic Desktop. Допущением при компьютерном моделировании дисковых ЭМ было принято моделирование дисковой ЭМ в двухмерной (2D) постановке.

1. Оценка влияния применяемых электротехнических материалов на массу статора дисковой ЭМ показала, что сердечник статора из кобальтовой стали 49К2ФА в сравнении с сердечником статора из кремниевой стали 2421 обладает на 23,3% меньшей массой и на 5,3% меньшей осевой длиной благодаря снижению поперечного сечения зубцов и ярма сердечника статора.

2. Из результатов моделирования конструктивных исполнений дисковых ЭМ установлено, что масса активной части безжелезной дисковой ЭМ со сборкой Хальбаха обладает наименьшей массой активных частей в 48,1 кг, что меньше, чем масса конструкции с одним ротором и одним статором на 35%, конструкции с одним ротором со сборкой Хальбаха и одним статором – на 33%, конструкции с двумя роторами и сегментированным безъярмовым сердечником статора – на 24%, конструкции с двумя роторами со сборками Хальбаха и сегментированным безъярмовым сердечником статора – на 21%. Это позволяет сделать вывод о том, что безжелезные дисковые ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха имеют наибольшие значения удельной мощности относительно других конструкций при одинаковых габаритах и электромагнитных нагрузках.

3. С применением компьютерной модели, проведена параметрическая оптимизация энергетических параметров безжелезной дисковой ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха. Установлено, что увеличение максимальной индукции в воздушном зазоре на 20% достигается при увеличении углового размера тангенциально намагниченных ПМ на 50%. Это позволяет сделать вывод о том, что увеличение углового размера тангенциально намагниченных ПМ, и пропорциональное уменьшение углового размера аксиально намагниченных ПМ ведет к повышению плотности магнитного потока в воздушном зазоре и увеличению энергоэффективности дисковой ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха на роторе.

ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДИСКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

4.1 Машины с высокотемпературными сверхпроводящими материалами

Помимо машин, основанных на традиционных и композитных материалах, высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) материалы открывают новые возможности для повышения удельной мощности электрических машин. Они могут пропускать значительно более высокие плотности тока по сравнению с традиционными проводниками [100]. Следовательно, потенциально могут быть созданы гораздо более высокие плотности потока в воздушном зазоре и токовые нагрузки, но за счет более сложной криогенной системы охлаждения. Эта сложность увеличивается с понижением рабочей температуры сверхпроводника (что, в свою очередь, позволяет использовать даже более высокие плотности тока).

Некоторые прототипы рабочих машин были изготовлены со сверхпроводящим ротором (сверхпроводящий материал используется только в обмотках возбуждения) [101]. Что касается полностью сверхпроводящих машин (сверхпроводящий материал, используемый как в якорях, так и в обмотках возбуждения), в настоящее время известна только одна попытка реализации, в результате которой сделан вывод о том, что требуются дальнейшие исследования в этом направлении. С теоретической точки зрения, машины со сверхпроводящими материалами на порядок более энергоемкие, чем обычные машины, однако до сих пор их характеристики сопоставимы только с показателями, достигнутыми на традиционных машинах.

Наиболее перспективными для применения в электротехнике и энергетике являются ВТСП-соединения на основе иттриевой керамики $YBCO$ – при температуре жидкого азота (77 К), а также на основе диборида магния MgB_2 и висмутовой керамики $BSCCO$ – при температурах жидкого водорода и неона. Каждый из перечисленных выше ВТСП-материалов имеет свои достоинства и недостатки.

ВТСП-материал на основе диборида магния MgB_2 обладает более высоким значением критической плотности тока по сравнению с висмутовыми керамиками. При этом использование сверхпроводников на основе MgB_2 отличается слабая анизотропия сверхпроводящих свойств и низкая стоимость. Затраты на изготовление таких проводов значительно более низкие в сравнении с ВТСП-лентами (как $BSCCO$, так и $YBCO$ тонкопленочными проводниками). Однако температура перехода в сверхпроводниковое состояние ($T_c=40$ К) позволяет успешно применять его лишь при температурах жидкого водорода (20 К) и неона (27 К).

Применение висмутовых керамик $BSCCO$ на уровне азотных температур сильно ограничено из-за малой величины критических токов, а также низкой механической прочности.

ВТСП-провода второго поколения на основе иттриевых керамик ($YBCO$) имеют высокое значение критической плотности тока, меньше подвержены влиянию внешнего магнитного поля и имеют высокие механические характеристики на уровне температур жидкого азота. Поэтому наиболее распространенный тип ВТСП-проводников – это проводники на основе иттриевых керамик ($YBCO$).

Разработки электрических ВТСП-машин можно разделить на следующие основные группы [103]:

- электрические машины с ВТСП обмотками постоянного тока в индукторе (ЭМ на холодном роторе);
- электрические машины с ВТСП-обмотками переменного тока в якоре (ЭМ на холодном статоре);

Конструкция первой группы с холодным ротором предполагает размещение ВТСП на роторе. К достоинствам конструкции первой группы относят высокую индукцию магнитного поля $B > 1-1,5$ Тл, повышенную токовую нагрузку ВТСП-индуктора, большие фазные напряжения, низкий уровень потерь, большую величину немагнитного зазора и, как следствие, низкий уровень индуктивных сопротивлений.

Конструкция второй группы с холодным статором предполагает размещение ВТСП на статоре и применение постоянных магнитов на роторе. Преимущества второй группы электрических ВТСП-машин связывают с повышенными значениями токовой нагрузки, низким уровнем индуктивных сопротивлений, а также с малыми потерями в статорных обмотках, что существенно влияет на увеличение КПД машины.

Основные ограничения при использовании высокотемпературных сверхпроводниковых лент в составе обмоток электрических машин [104]:

- во-первых, токонесущая способность ВТСП-лент зависит от величины воздействующего на них внешнего магнитного поля (что накладывает ограничения на применение конструкций без сердечников на статоре и роторе из-за больших полей рассеяния);

- во-вторых, существует минимальный радиус изгиба, при котором может функционировать ВТСП-лента;

- в-третьих, современные сверхпроводниковые ленты второго поколения могут выйти из сверхпроводникового состояния в силу механического воздействия, например при вибрациях.

В 2020 году Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ) совместно с ЗАО «СуперОкс», получив грант от российского Фонда перспективных исследований, разработали ВТСП-электродвигатель для применения на одномоторном винтовом самолете Як-40, пробные запуски которого были осуществлены в декабре 2020 года [105]. Электродвигатель является частью демонстратора гибридной силовой установки, которую разрабатывает ЦИАМ. В перспективе 15-20 лет по мере усовершенствования технологий экономия топлива может составить до 75%. По данным компании «СуперОкс», ВТСП-электродвигатель обладает удельной мощностью в 2-5 раз выше, чем традиционные аналоги схожих габаритов.

Из рассмотренных работ [100-105] выявлено, что наиболее надежными являются ЭМ с ВТСП-обмотками на статоре, в то время как ЭМ с ВТСП-обмотками на роторе обладают более сложной конструкцией.

4.2 Исследование конструкций дисковых ЭМ с ВТСП-обмотками и криогенным охлаждением

Одним из способов повышения удельной мощности ЭМ является применение ВТСП-материалов. Обмотки из ВТСП могут быть расположены как на роторе, так и на статоре ЭМ. В первом случае обмотка из ВТСП на роторе позволяет создать гораздо более высокую напряженность поля в воздушном зазоре с использованием небольшого объема обмотки возбуждения. Во втором случае использование обмотки из ВТСП на статоре позволяет полностью убрать тепловые потери в обмотке. А так как конструкция ротора в данном случае остается стандартной, то ЭМ с ВТСП на статоре значительно проще конструировать на работу в высокоскоростных системах.

ЭД с аксиальным магнитным потоком представляет собой конструкцию с одним дисковым ротором и одним сердечником статора с зубцами (ЭД 1). Также были рассмотрены конструкции с дисковым ротором с магнитной сборкой Хальбаха (ЭД 2) и с беспазовым статором (ЭД 3).

Ротор ЭД состоит из ПМ-сплава $SmCo$ и ярма для замыкания магнитного потока. Сердечник статора набирается из листов электротехнической стали 2421 с толщиной 0,18 мм, а в пазах сердечника статора расположена обмотка из ВТСП.

В рассматриваемых вариантах конструкций электрических машин с ВТСП используется конструкция с так называемым холодным статором. Данная конструкция предполагает размещение ВТСП на статоре и применение постоянных магнитов на роторе. Предельная плотность тока в ВТСП-обмотке составляет 50 А/мм², размеры ленты ВТСП составляют 4×0,25 мм. При этом минимальный радиус сгиба катушки фазы из ВТСП составляет 10 мм. ВТСП-обмотка располагается в криостате. Материал криостата – стеклопластик, толщина криостата 2 мм. ВТСП-обмотки статора имеют особое расположение ввиду размещения их в криостате и наличия изоляции обмоток. Расстояние ВТСП-обмотки от криостата составляет 2 мм, расстояние от криостата до сердечника статора – 2 мм. Таким образом, расстояние обмотки из ВТСП от сердечника статора

должно составлять не менее 6 мм, а расстояние между проводниками – не менее 1 мм (рисунок 4.1), вследствие чего коэффициент заполнения паза существенно ниже по сравнению с ЭМ с медной обмоткой и составляет 15-20%. Частота перемагничивания для проводников из ВТСП ограничена величиной в 600 Гц, что обусловлено характеристиками материала ВТСП.

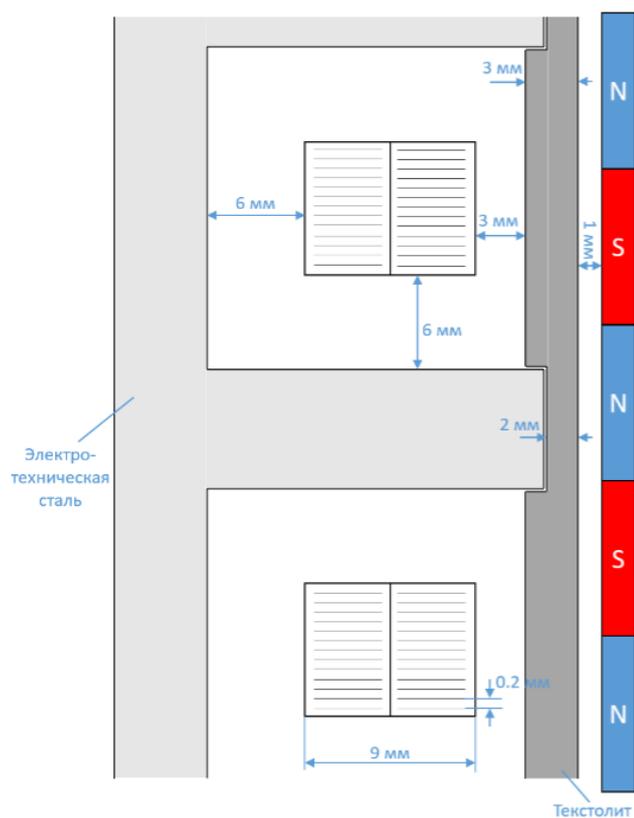


Рисунок 4.1 – Эскиз активной части ЭД с ВТСП-обмотками

Электромагнитные расчеты дисковых ЭД проведены методом конечных элементов в двухмерной постановке в программном комплексе *Ansys Electronics Desktop*. Дисковые ЭД рассчитаны на выходную мощность 60 кВт, частоту вращения 2000 об/мин и напряжение питания 270 В постоянного тока. На рисунках 4.2-4.4 представлены общий вид ЭД 1, ЭД 2, ЭД 3, а на рисунке 4.5. – схема соединения обмоток.

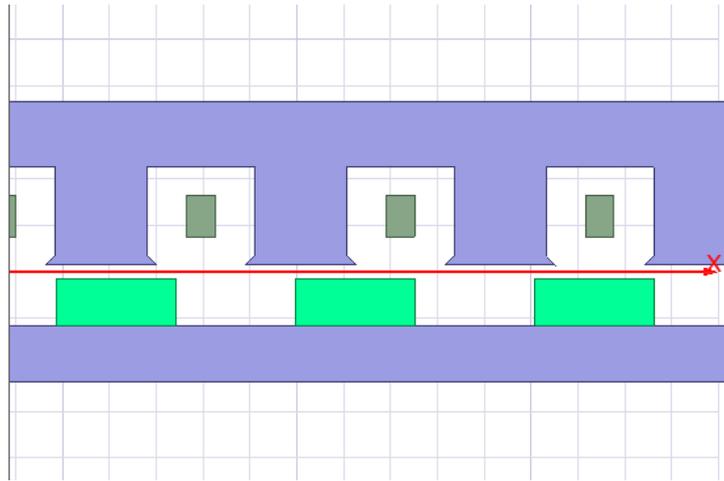


Рисунок 4.2 – Общий вид ЭД 1

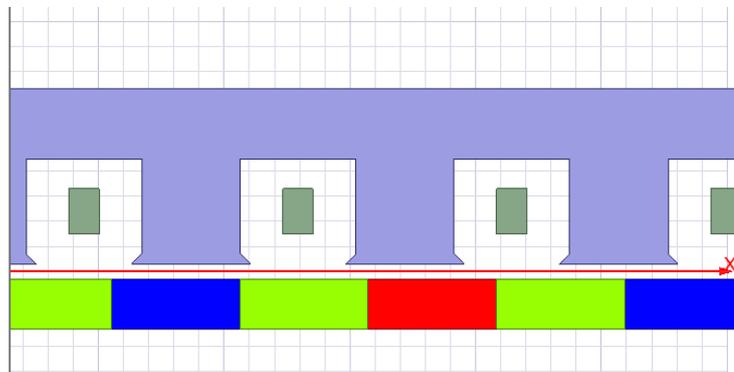


Рисунок 4.3 – Общий вид ЭД 2

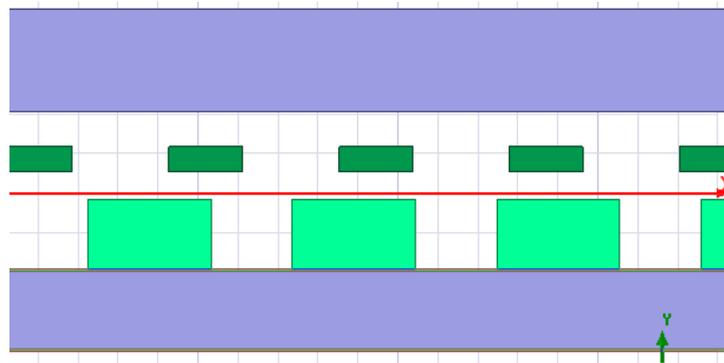


Рисунок 4.4 – Общий вид ЭД 3

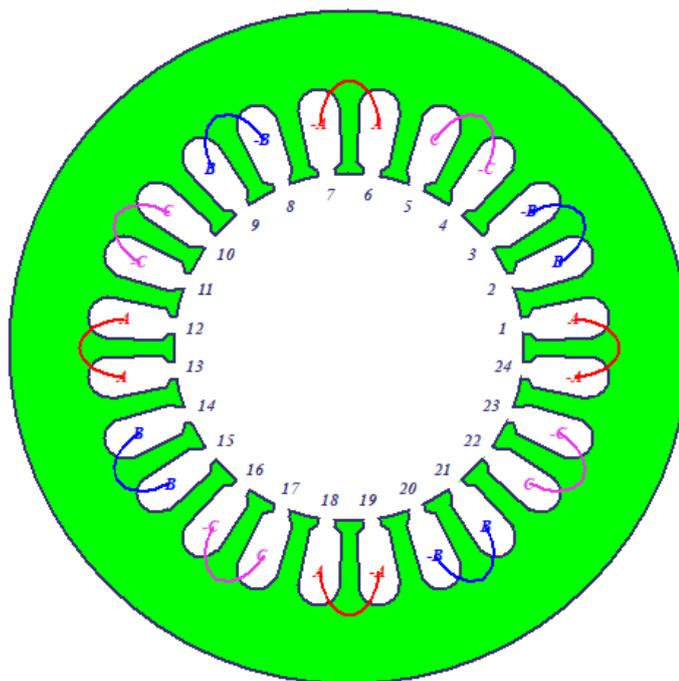


Рисунок 4.5 – Схема соединения обмоток

Результаты расчета дискового электродвигателя с высокотемпературными сверхпроводниками представлены в таблице 1.15.

Таблица 4.1 – Результаты расчета ЭД

Параметр	Величина		
	ЭД 1	ЭД 2	ЭД 3
ЭД	ЭД 1	ЭД 2	ЭД 3
Выходная мощность, кВт	60		
Частота вращения, об/мин	2000		
Напряжение питания, В	270		
Количество фаз	3		
Ток фазы <i>rms</i> , А	288	291	247
Количество полюсов/пазов статора	20/24		
Тип обмотки	Зубцовая однослойная обмотка, 2 параллельные ветви, 80 витков в фазе		
Обмоточный коэффициент	0,966	0,966	0,966
Плотность тока <i>rms</i> , А/мм ²	52,2	52,7	54,3
Линейная токовая нагрузка <i>rms</i> , А/м	67700	68400	70800
Активное сопротивление, мОм	–	–	–
Индуктивность фазы общая по <i>d/q</i> осям, мкГн	136/133	77/77	154

Частота перемагничивания, Гц	333	333	333
Магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл	0,44	0,45	0,45
Потери в обмотке, Вт	–	–	–
Потери в стали, Вт	341	100	60
Потери на вихревые токи в постоянных магнитах, Вт	670	380	590
Добавочные потери (инвертора), Вт	200	200	200
Общие электромагнитные потери, Вт	1211	680	850
КПД (электромагнитный, без учета механических потерь), %	98	98,8	98,6
Марка постоянных магнитов	<i>SmCo</i> , S30M		
Сталь статора	2421		
Сталь ротора	30ХГСА		
Масса постоянных магнитов, кг	5,7	6,4	3,2
Масса магнитопровода ротора, кг	11,5	–	7
Масса магнитопровода статора, кг	13	13,2	13,2
Масса активной части (без учета обмотки), кг	30,2	19,6	23,4
Тип охлаждения статора и ротора	Воздушное	Воздушное	Воздушное

Как видно из таблицы 4.1, видно что ЭД 1 со стандартной магнитной системой ротора обладает массой активных частей 30,2 кг, ЭД 2 с магнитной сборкой Хальбаха (без сердечника на роторе) – 19,6 кг, ЭД 3 с беспазовым статором – 23,4 кг. Таким образом, масса активных частей ЭМ с ВТСП обмотками и сборкой Хальбаха на 35% ниже чем у ЭМ со стандартной магнитной системой ротора и на 16% ниже чем ЭМ с беспазовым статором. На рисунках 4.6 и 4.7 приведены картины магнитных полей дисковых ЭД с ВТСП обмотками.

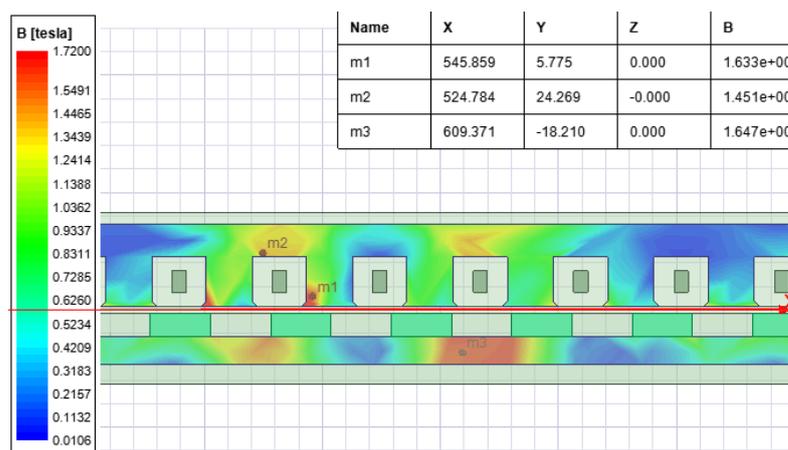


Рисунок 4.6 – Картина магнитных полей ЭД 1

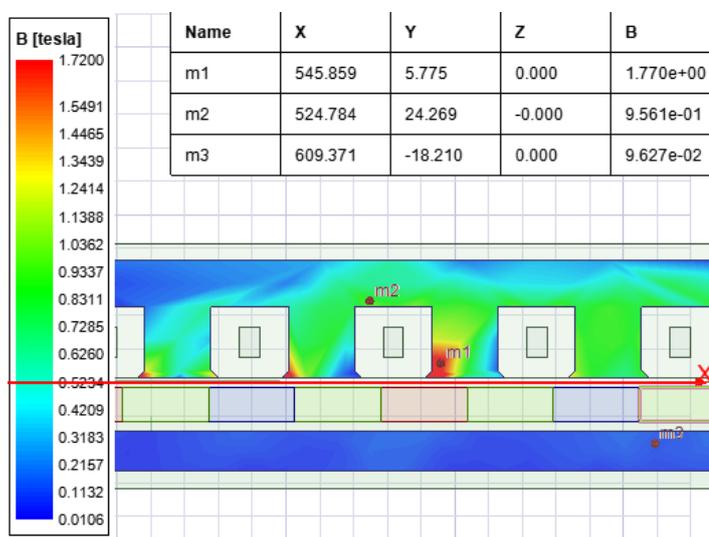


Рисунок 4.7 – Картина магнитных полей ЭД 2

Из рисунков 4.6 и 4.7 видно, что магнитные индукции не превышают предельных величин для стали 2421 (1,7 Тл).

Как было отмечено ранее, токонесущая способность ВТСП лент зависит от величины воздействующего на них переменного внешнего магнитного поля. С применением разработанной компьютерной модели была проведена параметрическая оптимизация паза статора дисковой ЭМ с ВТСП обмотками. При использовании ВТСП обмоток на статоре необходимо учитывать увеличение паза от наличия криостата, а также учитывать влияние переменных магнитных полей, действующих на ВТСП ленту в перпендикулярном направлении. Таким образом, целью оптимизации является минимизация потоков рассеяния в пазу статора, а

критерием оптимизации \rightarrow обеспечение минимальной магнитной индукции, действующей на ВТСП ленту в перпендикулярном направлении (B_{\min}). В качестве ограничения выступает минимально допустимый размер высоты паза (h_{slotmin}), определенный размером криостата. Переменной является высота паза статора (h_{slot}). Для оптимизации применялся метод упорядоченного перебора, а математическая формулировка выглядит следующим образом:

$$B_{\min} = f(h_{\text{slot}}) = \min, \text{ при } h_{\text{slotmin}} = \text{const} . \quad (42)$$

На рисунке 4.8 приведен эскиз пазовой зоны и ВТСП обмотки. В таблице 4.2 приведены изменения магнитной индукции, действующей на ВТСП обмотку, индуктивностей, потерь и массы магнитопровода при изменении высоты паза. На рисунке 4.9 приведена зависимость величины индукции, действующей на ВТСП обмотку, от высоты паза статора. На рисунке 4.10 представлены магнитные поля, действующие на ВТСП-обмотки при разных угловых положениях ротора ЭД.

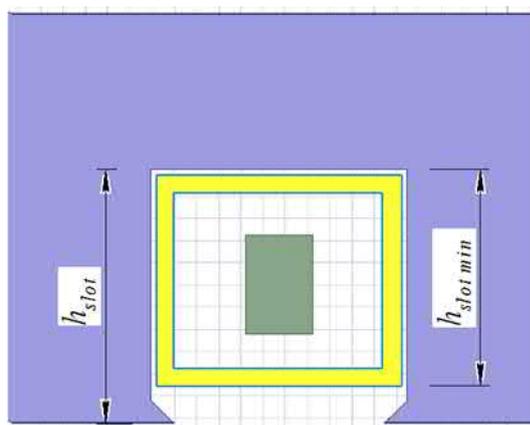


Рисунок 4.8 – Эскиз пазовой зоны

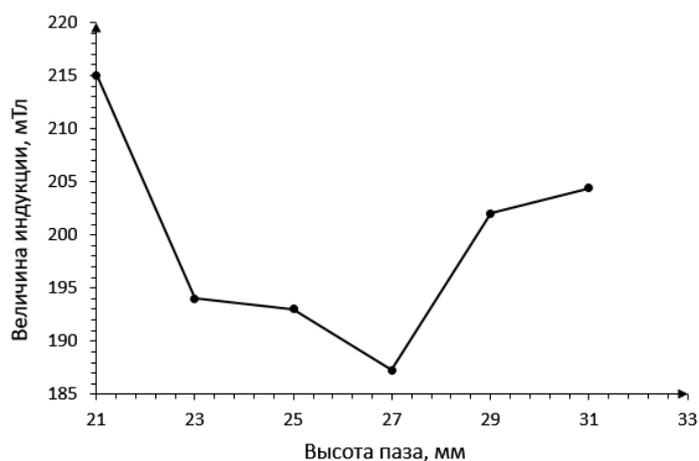


Рисунок 4.9 – Зависимость величины индукции, действующей на ВТСП обмотку, от высоты паза статора

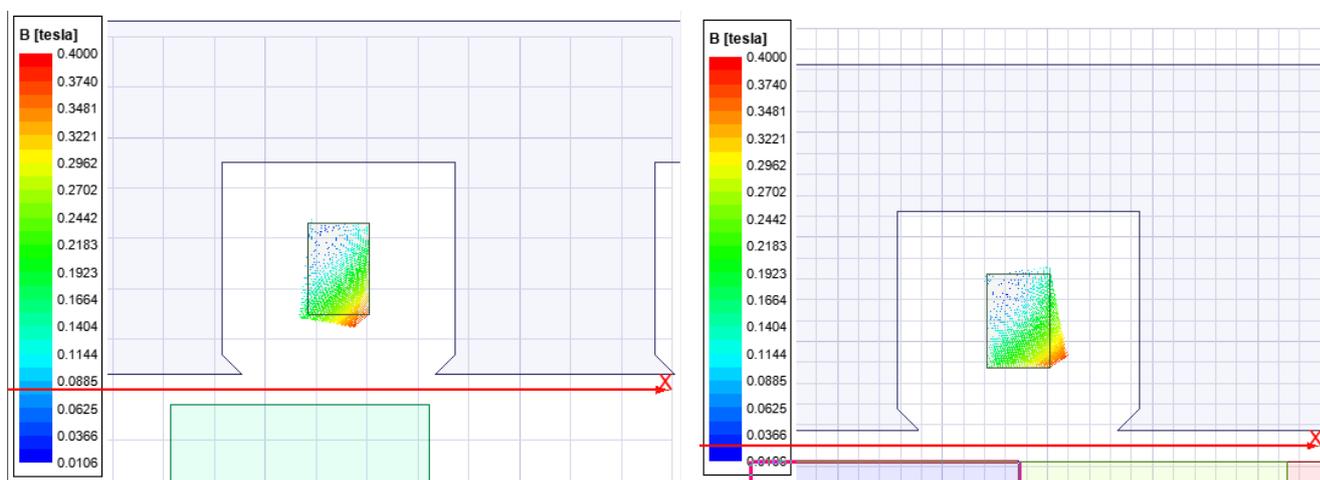


Рисунок 4.10 – Магнитное поле, действующее на ВТСП-обмотки при разных угловых положениях ротора

Таблица 4.2 – Изменения магнитной индукции действующей на ВТСП обмотку, индуктивностей, потерь и массы магнитопровода при изменении высоты паза

Высота паза ($h_{\text{паз}}$), мм	Индукция на отрезке ленты, мТл	Индуктивности по d/q -осям, мкГн	Потери в стали, Вт	Потери на вихревые токи в постоянных магнитах, Вт	Масса магнитопровода статора, кг
21 (начальный уровень)	215	77/77	100	380	13,2
23	193	83/83	102	361	13,72
25	193,5	89/89	109	355	14,23
27	187,3	95/95	113	357	14,74
29	202	101/101	120	347	15,25
31	204,4	108/108	131	345	15,76

Из таблицы 4.2 и рисунка 4.9 видно, что с увеличением высоты паза наблюдается снижение величины магнитной индукции, действующей на ВТСП обмотку. Однако при увеличении высоты паза статора, на 28% от начальной величины, магнитная индукция начинает возрастать, что связано с увеличением потоков рассеяния. Следует также отметить, что при увеличении высоты паза также возрастают потери в стали и масса магнитопровода статора. Таким образом, рекомендацией при проектировании ЭМ с ВТСП обмотками является увеличение высоты паза статора с целью минимизации индукции, действующей на ВТСП ленту. Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение с ВТСП-обмоток на статоре позволяет создавать ЭМ с высокими удельными характеристиками, однако свойства ВТСП материалов накладывают некоторые ограничения.

Выводы к главе 4

Проведены обзор и исследования применения высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов в ЭМ с целью определения возможных путей повышения удельной мощности. Были получены рекомендации при проектировании ЭМ с ВТСП обмотками с учетом конструкционных и электромагнитных ограничений.

1. Определены основные ограничения при использовании ВТСП в составе обмоток ЭМ, такие как зависимость токонесущей способности ВТСП от воздействующего на них переменного внешнего магнитного поля и минимальный радиус изгиба ВТСП ленты. Установлено, что применение ВТСП-обмоток с криогенным охлаждением наиболее целесообразно при классах мощности ЭМ от 1 МВт. Это подтверждается также современными экспериментальными данными, полученными в ходе разработок более электрического самолета.

2. Разработаны компьютерные модели дисковых ЭМ с ВТСП материалами при номинальной мощности 60 кВт и частоте вращения 2000 об/мин. Результаты расчетов показали, что ЭМ со стандартной магнитной системой ротора

обладает массой активных частей 30,2 кг, ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха – 19,6 кг, ЭМ с беспазовым статором – 23,4 кг.

3. С использованием разработанных моделей была проведена параметрическая оптимизация паза статора дисковой ЭМ с ВТСП обмотками. Установлено, что с увеличением высоты паза наблюдается снижение величины магнитной индукции, действующей на ВТСП обмотку. Однако при увеличении высоты паза статора, на 28% от начальной величины, магнитная индукция начинает возрастать, что связано с увеличением потоков рассеяния. При увеличении высоты паза также возрастают потери в стали и масса магнитопровода статора. Таким образом, снижение магнитной индукции, действующей на ВТСП обмотки путем увеличения высоты паза обосновано только до определенных значений.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗЖЕЛЕЗНОГО ДИСКОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СО СБОРКОЙ ХАЛЬБАХА

5.1 Проектирование безжелезного дискового электродвигателя

5.1.1 Исходные данные и расчеты макетного образца дискового ЭД

При расчете заданными параметрами являются частота вращения ротора, номинальное напряжение, мощность и свойства высококоэрцитивных постоянных магнитов (ПМ). При проектировании использовалась ранее представленная методика совместно с численным компьютерным моделированием. В таблице 5.1 приведены исходные данные для проектирования.

Таблица 5.1 – Исходные данные для проектирования

Параметр	Величина
Частота вращения, об/мин	3000
Номинальная мощность, кВт	0,3
Напряжение питания, В	17
Число фаз	3
Охлаждение	Воздушное

Материал постоянных магнитов – $NdFeB$ марки $N38UH$ с остаточной намагниченностью 1,2 Тл и коэрцитивной силой 950 кА/м, предназначенный для работы при температуре до 180 С. На рисунке 5.1 представлен общий вид дискового двигателя в программном комплексе *Ansys Maxwell*.

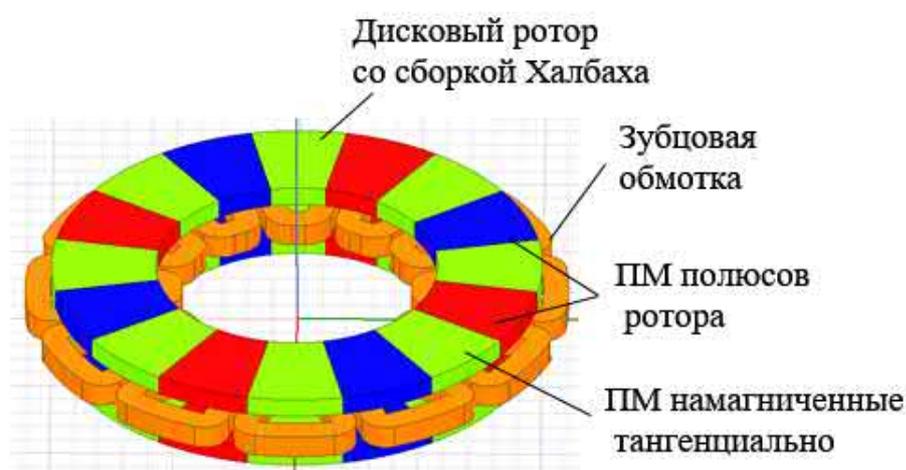


Рисунок 5.1 – Общий вид дискового двигателя

Трехфазная обмотка статора выполнена двухслойной зубцовой. При этом на каждый зубец статора приходится одна катушка, состоящая из 4 витков. Проводники обмотки состоят из 10 параллельных проводов диаметром 1 мм, изготовленных из материала ПНЭТ-имид с температурой эксплуатации до 220 °С.

В таблице 5.2 представлены полные результаты расчета дискового двигателя, такие как габаритные размеры, обмоточные данные и данные ПМ.

Таблица 5.2 – Результаты расчета дискового двигателя

Параметр	Величина
Внешний диаметр статора/ротора, мм	200
Внутренний диаметр статора/ротора, мм	115
Число пазов статора	12
Величина воздушного зазора с одной стороны, мм	3
Толщина статора, мм	10
Число слоев обмотки статора	2
Число параллельных ветвей	1
Диаметр жилы, мм	1
Число жил в одном проводнике	10
Число проводников в пазу	8
Число катушек в фазе	4
Шаг обмотки	1
Число полюсов, $2p$	8
Длина ПМ, мм	42,5
Толщина ПМ, мм	8

5.1.2 Электромагнитные расчеты макетного образца дискового ЭД

На рисунке 5.2 представлена картина магнитных полей в дисковом двигателе. На рисунке 5.3 показано распределение потерь в ПМ от вихревых токов. Величина потерь в ПМ от вихревых токов на расчетном режиме составляет приблизительно 45 Вт.

На рисунках 5.4-5.6 представлены осциллограммы, полученные при моделировании дискового двигателя. Из рисунка 5.4 видно, что пиковое значение силы тока в фазе составляет 43 А. Величина противо-ЭДС на рисунке 5.5 составляет 12 В. Согласно рисунку 5.6 пиковая величина магнитной индукции в зазоре дискового двигателя составляет 0,5 Тл.

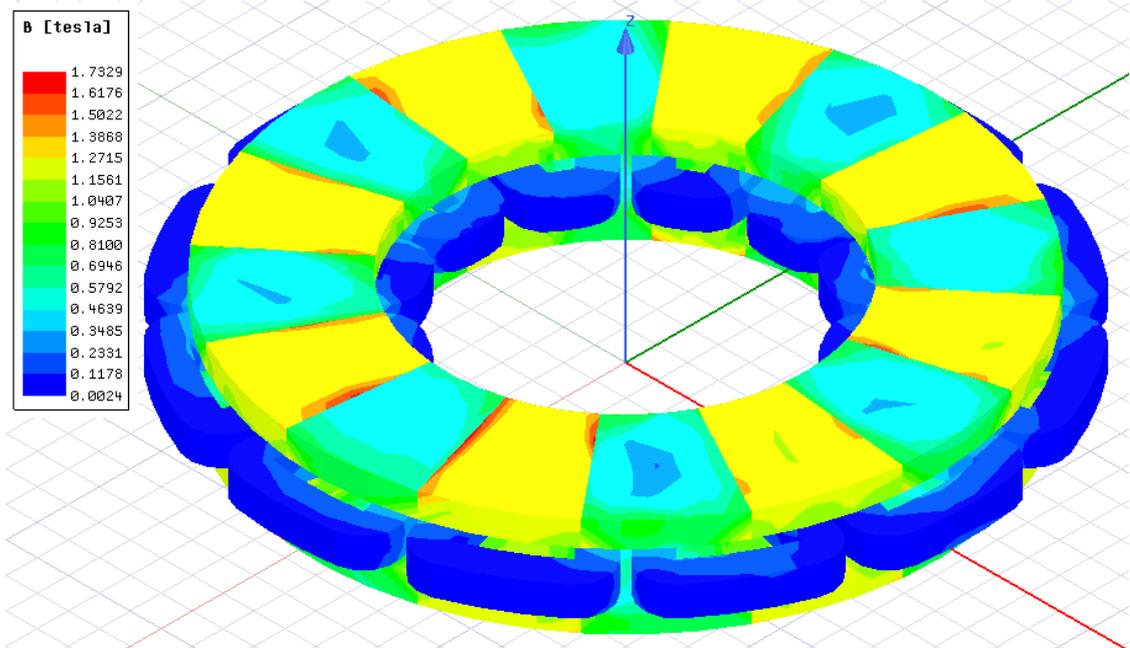


Рисунок 5.2 – Картина магнитных полей в дисковом двигателе

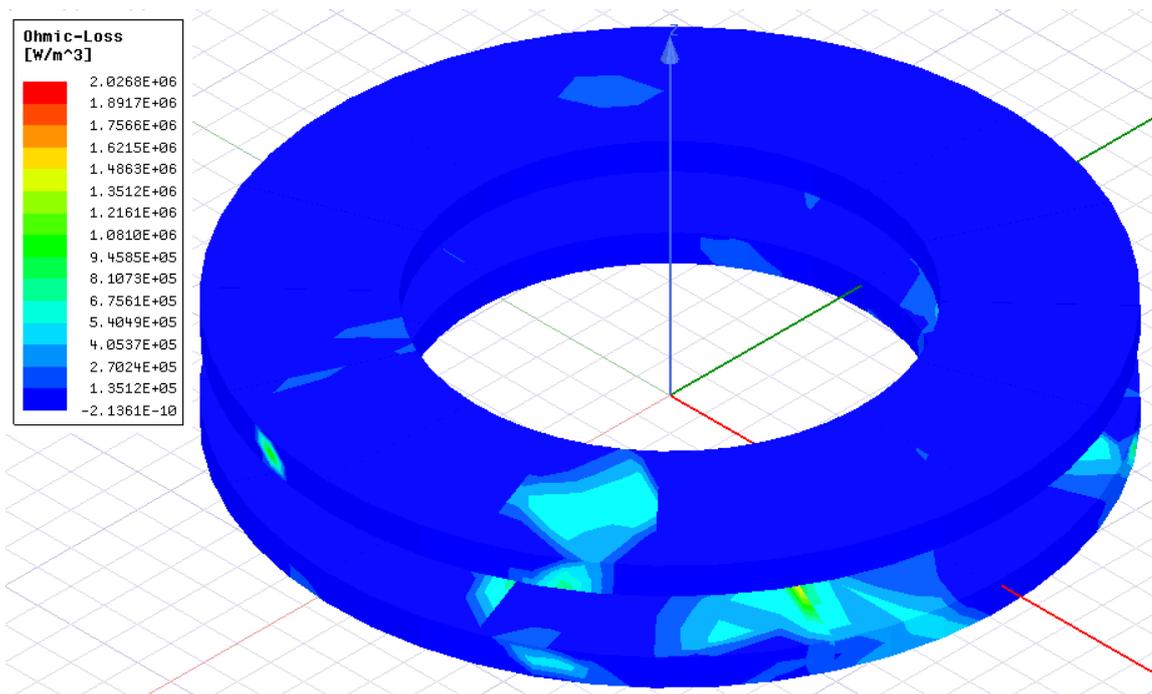


Рисунок 5.3 – Распределение потерь в ПМ от вихревых токов

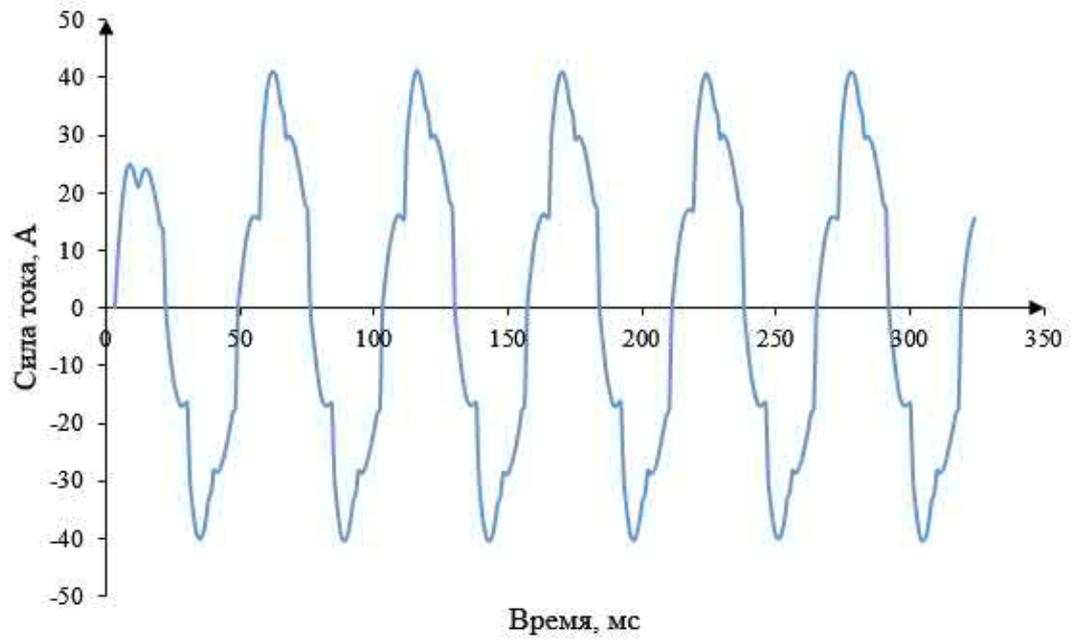


Рисунок 5.4 – Осциллограмма токов в одной фазе

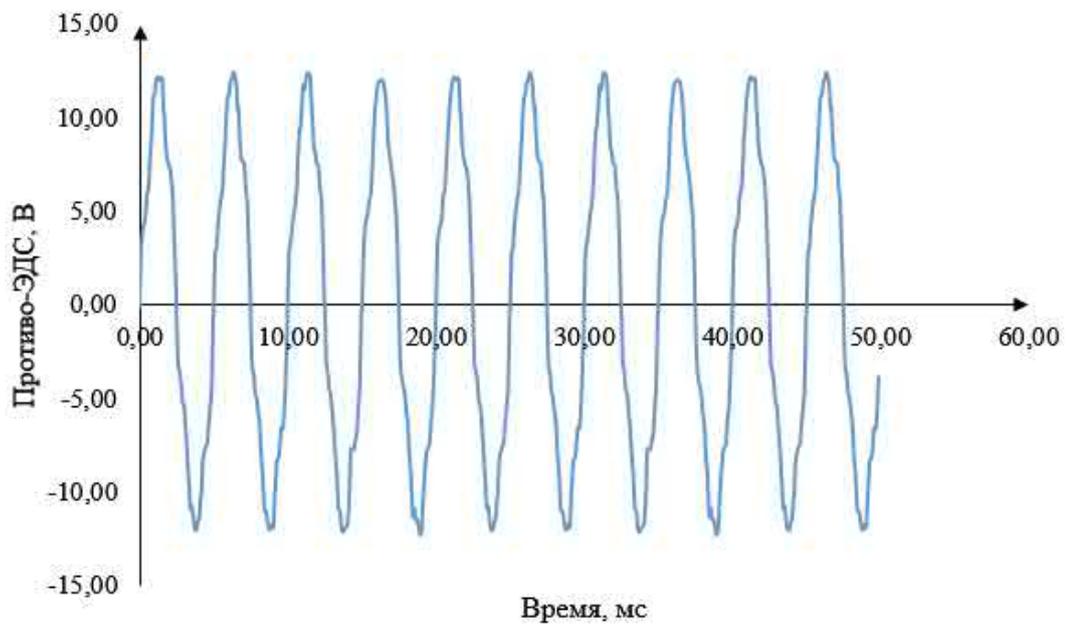


Рисунок 5.5 – Осциллограмма против-ЭДС в одной фазе

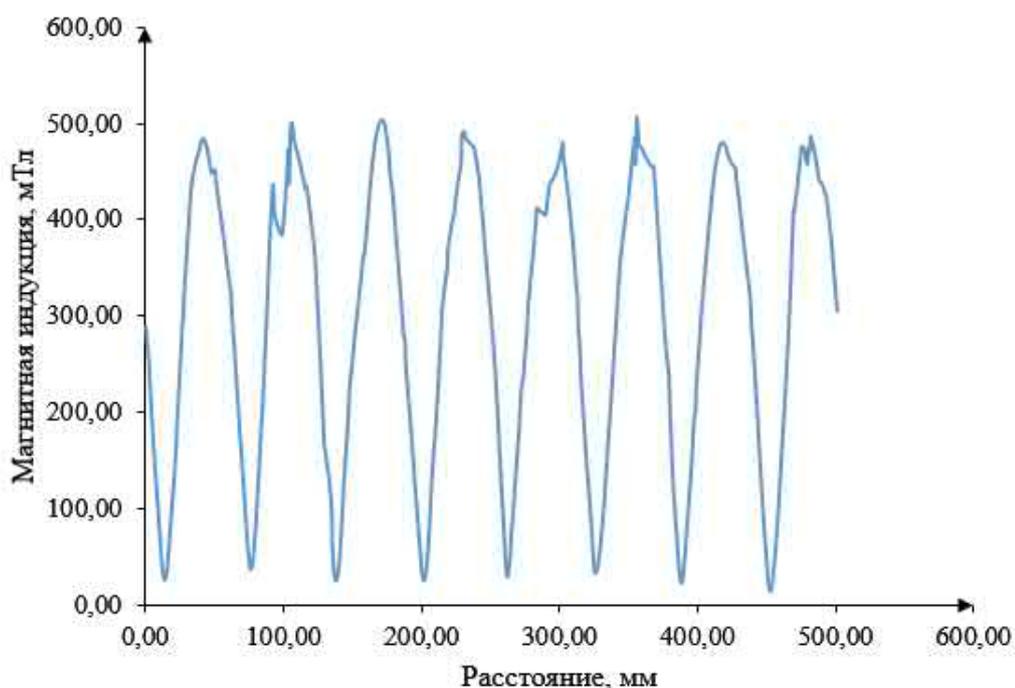


Рисунок 5.6 – Кривая магнитной индукции в зазоре

5.1.3 Тепловые расчеты макетного образца дискового ЭД Описание расчетной модели и граничных условий

Параметры и выходные характеристики дисковой ЭМ получены из расчетов в *Ansys Electronics Desktop*. Теплопроводность пропитки принята равной 0,22 Вт/м/К, бандажа и стеклотекстолитовых прокладок – 0,3 Вт/м/К.

С учетом вычислительных возможностей в расчетной модели в местах наиболее сложной геометрии внесены следующие изменения: упрощена геометрия отдельных деталей, не влияющая на характер течения и параметры потоков; обеспечено гарантированное «прилегание» всех деталей без зазоров и технологических допусков. Для сокращения расчетного времени при моделировании использовалась геометрическая модель сектора с углом разворота 60° (рисунок 5.7).

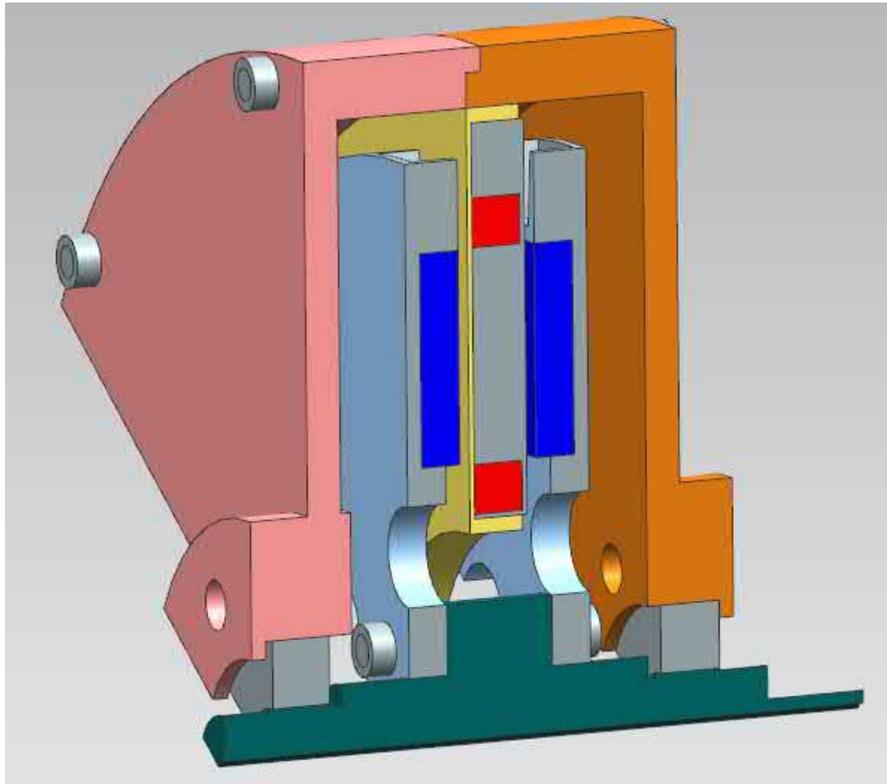


Рисунок 5.7 – Геометрическая модель

Для построения расчетных сеток использован сеточный построитель рабочей оболочки *Workbench*. Сетка построена в полуавтоматическом режиме по методу *Patch-Independent* с установками (размер элемента, минимальная кривизна, максимальный размер грани и т.д.). Размерность сетки конечных объемов (рисунок 5.8) составила 32 066 662 элемента и 5 982 896 узлов.

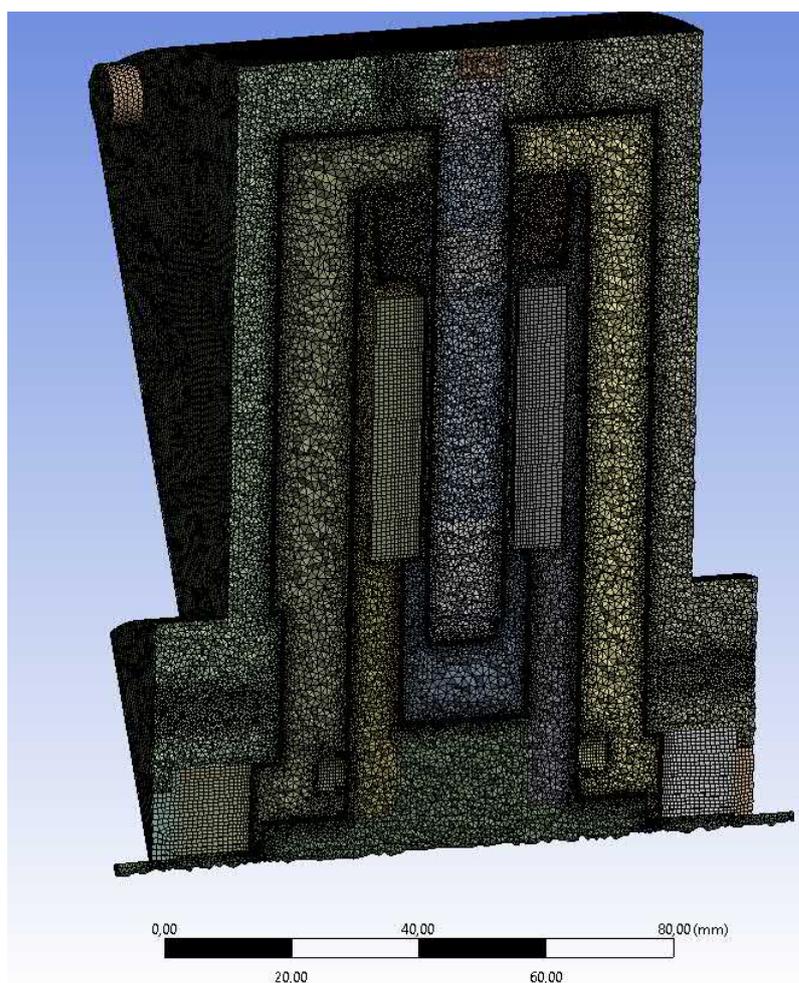


Рисунок 5.8 – Сетка конечных объемов

В качестве граничных условий модели использованы следующие параметры:

1. На входе в воздушную область (со стороны торца) задаются полные параметры воздушного потока: температура $T_B^* = 30^\circ\text{C}$ и давление $p_B = 101325$ Па.

2. На выходе из воздушной области задаются статические параметры: температура $T_B^* = 30^\circ\text{C}$ и давление $p_B = 101325$ Па.

3. Вращающиеся области (каналы ротора, область вокруг вентилятора) смоделированы при помощи вращающейся системы координат с частотой вращения $n = 3000$ об/мин.

3. На всех боковых поверхностях модели (*Periodic*) задается условие циклической симметрии вдоль продольной оси вращения модели.

В качестве критерия сходимости решения принята максимальная невязка типовых параметров качества вычислений, используемых в программе *Ansys* (допустимая ошибка расчетов определена на уровне $\Delta \leq 10^{-4}$).

Результаты теплового расчета

На рисунках 5.9 и 5.10 представлены расчетные поля распределения температур, полученные в *Ansys Fluent*. На рисунке 5.9 также показано движение воздушных потоков в дисковой ЭМ. Из рисунков 5.9 и 5.10 видно, что в области обмоток в безжелезном статоре образуется высокотемпературная зона. Максимальная температура, наблюдаемая в обмотке, составляет 118 °С. Максимальная температура ротора составляет 52 °С, статора – 78 °С, постоянных магнитов – 52 °С. Осредненная температура фланца составляет 32 °С.

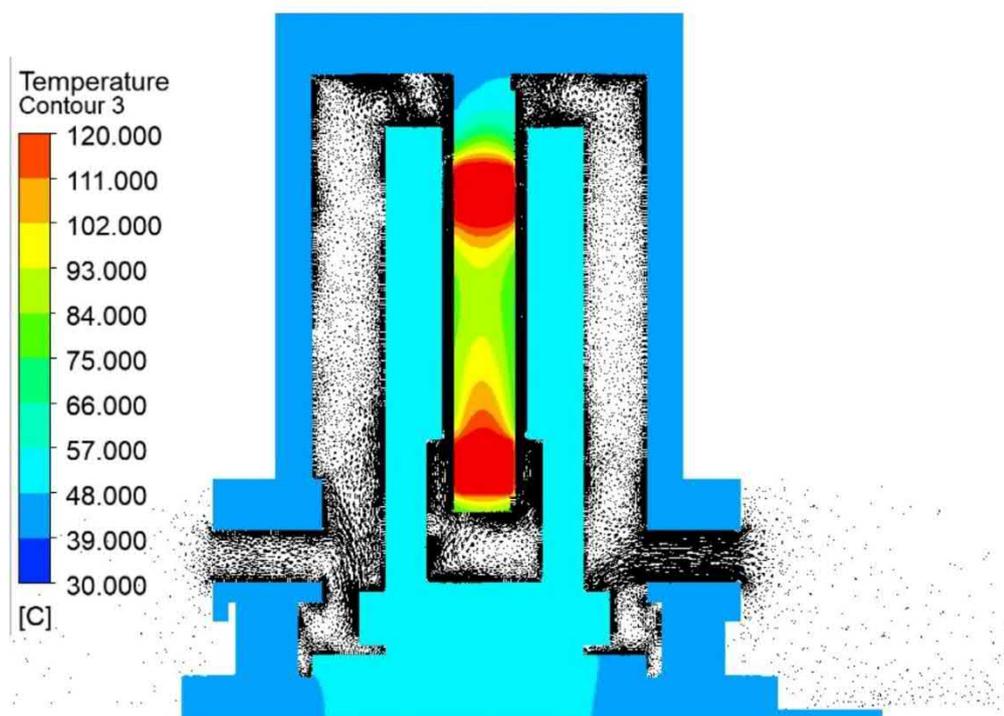


Рисунок 5.9 – Поле распределения температур в продольном сечении

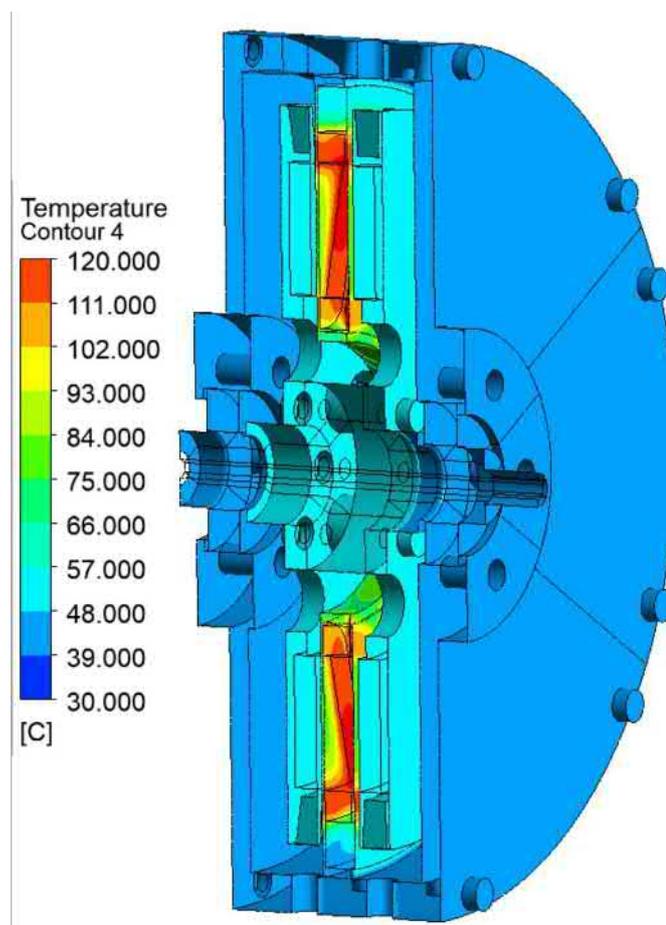


Рисунок 5.10 – Поле распределения температур на поверхностях

5.2 Программа и методика испытаний безжелезного дискового электродвигателя

5.2.1 Общие положения

- Испытания проводить в нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150-69.
- Нормальные климатические условия (НКУ) характеризуются следующими значениями:
 - температура воздуха от плюс 15 до плюс 35 °С;
 - относительная влажность воздуха от 45 до 75%;
 - атмосферное давление от 86 до 106 кПа (от 645 до 795 мм рт. ст.).

Примечание: при температуре воздуха выше плюс 30 °С относительная влажность воздуха не должна превышать 70%.

- Продолжительность испытаний – время, необходимое для снятия

параметров, если в методах испытаний не указано иное.

- Допустимые погрешности измерения параметров указаны в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Допускаемые погрешности измерения параметров, указанных без допусков

Параметр	Погрешность измерения
Масса	$\pm 2,5\%$ (относительная погрешность)
Температура в диапазоне от минус 60°C до плюс 90°C	$\pm 3\%$ (абсолютная погрешность)
Электрические величины	$\pm 2\%$ (относительная погрешность)

- При оценке внешнего вида устройства после испытаний допускаются следы коррозии на шлицах и кромках крепежных деталей (при возможности зачистки и последующего покрытия этих мест лаком) и белый налет в виде пятен на цинковых и кадмиевых покрытиях элементов конструкции устройства. Для лакокрасочных покрытий допускаются незначительные изменения блеска, цвета или потемнение.

- Металлические корпуса измерительных приборов, эквивалент сети и другие средства контроля, используемые при испытаниях, а также металлический лист, должны быть заземлены. Защитное заземление должно быть выполнено в соответствии с ГОСТ 12.1.030-81.

- Требования к рабочим местам при работе стоя – в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.033-78, при работе сидя – с ГОСТ 12.2.032-78.

- Испытания должны проводить лица, прошедшие инструктаж и допущенные к работе с установками напряжением до 1000 В.

5.2.2 Внешний осмотр

При внешнем осмотре проверять соответствие изделия требованиям сборочного чертежа, маркировку, комплектность, габаритно-установочные и присоединительные размеры.

Результаты считать удовлетворительными, если макетный образец

соответствует требованиям сборочного чертежа.

5.2.3 Проверка сопротивления изоляции в нормальных климатических условиях (НКУ)

Сопротивление изоляции проверять мегаомметром на напряжение 500 В между одной из фаз, соединенных по схеме «звезда», и корпусом.

Результаты считать удовлетворительными, если сопротивление изоляции не менее 20 МОм.

5.2.4 Проверка электрической прочности изоляции в НКУ

Электрическую прочность изоляции проверять непосредственно после проверки сопротивления по п. 1.2.

На макетном образце проверку проводить подачей испытательного напряжения 500 В между одной из фаз, соединенных по схеме «звезда», и корпусом в течение 1 мин.

Один плюс источника напряжения прикладывается к выводу испытываемой обмотки, другой – к корпусу.

После проведения испытания повторно провести проверку сопротивления изоляции по п. 1.2.

Результаты считать удовлетворительными, если не произошло пробоя изоляции.

5.2.5 Проверка массы (нетто)

Массу макетного образца проверять на технических весах.

Результаты проверки считать удовлетворительными, если масса макетного образца не превышает значения, указанного в сборочном чертеже.

5.2.6 Проверка параметров в двигательном режиме

Макетный образец с помощью спроектированного приспособления установить на испытательный стенд.

Подключить макетный образец согласно схеме.

Подключить блок управления к источнику питания.

Закрепить на валу макетного образца динамометр.

Запустить макетный образец в нормальных климатических условиях при напряжении питания 17 В.

Фиксировать максимальное значение скорости вращения. При нагрузке частота вращения должна составлять не менее 3000 об/мин.

Измеренные значения записать в таблицу протокола испытаний.

5.2.7 Испытание на воздействие повышенной влажности

Не проводится.

5.2.8 Испытание на воздействие пониженной влажности

Не проводится.

5.2.9 Проверка антикоррозионных покрытий

Не проводится.

5.2.10 Контрольная разборка

Разобрать макетный образец и провести визуальный осмотр сборочных единиц и деталей устройства на соответствие конструкторской документации.

Результаты проверки считать удовлетворительными, если не произошло разрушения и износа деталей, которые могут привести к отказу.

5.3 Описание макетного образца и экспериментальные исследования

На основе результатов расчета создан макетный образец дискового двигателя, на котором были проведены экспериментальные исследования согласно разработанной программе и методике испытаний дискового ЭД. На рисунке 5.11 показан продольный разрез дискового двигателя. Ротор дискового двигателя состоит из двух дисков. Каждый из дисков содержит постоянные магниты, образующие массив Хальбаха. В качестве материала диска для закрепления массива постоянных магнитов использован сплав алюминия. Дисковые роторы закрепляются на стальном валу при помощи шпилек.

Статор дискового двигателя расположен между двумя роторами и содержит зубцовые обмотки, закрепленные на немагнитном основании, напечатанном на 3D-

принтере из *ABS*-пластика. Обмотка для придания жесткости залита эпоксидной смолой. Статор дискового двигателя крепится на корпусе из алюминиевого сплава. В корпусе и роторах дискового типа предусмотрены отверстия для улучшения охлаждения. На рисунке 5.12 показаны статор и роторы дискового типа. На рисунке 5.13 представлен экспериментальный образец дискового двигателя.

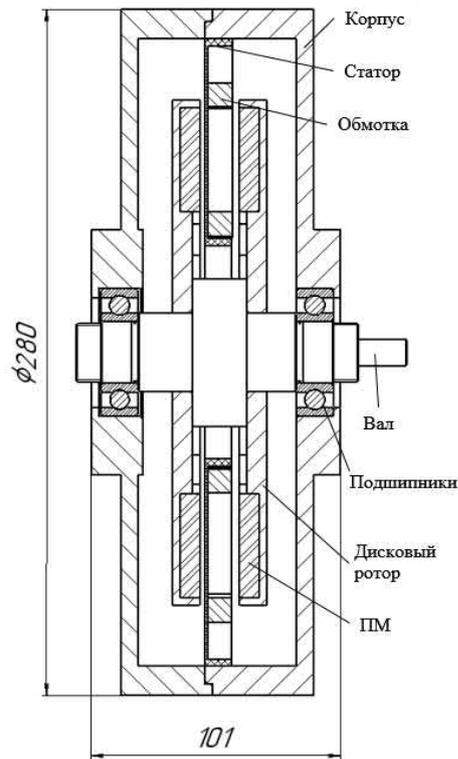


Рисунок 5.11 – Продольный разрез дискового двигателя

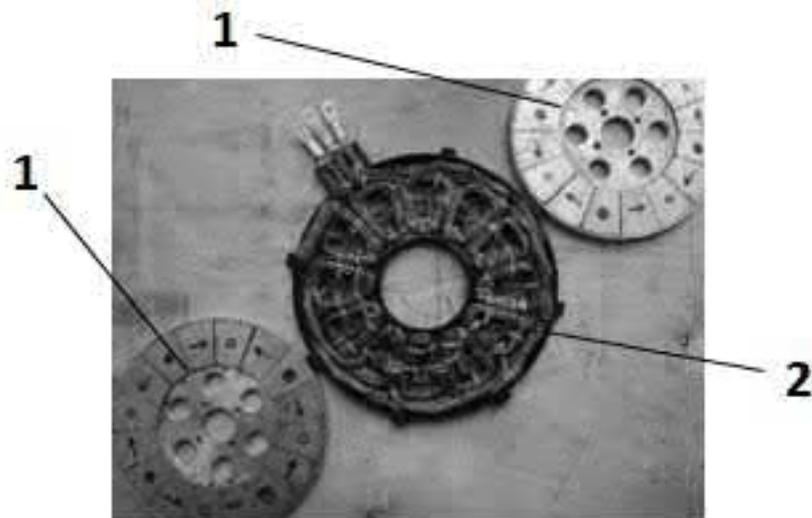


Рисунок 5.12 – Статор и дисковые ротора



Рисунок 5.13 – Экспериментальный образец дискового двигателя

На рисунке 5.12: 1 – ротор с магнитной сборкой Хальбаха, 2 – безжелезный статор. Экспериментальные исследования дискового двигателя проводились на стенде, который представлен на рисунке 5.14. Напряжение питания составляло 17 В постоянного тока. На рисунке 5.15 представлена система управления двигателем (автотрансформатор, мост с конденсаторами, инвертор, система управления инвертором). На рисунке 5.16 приведена функциональная схема экспериментальной установки, где 1 – автотрансформатор; 2 – источник питания 12 В постоянного тока; 3 – выпрямитель; 4 – система управления; 5 – автономный инвертор напряжения; 6 – контроллер вихретокового динамометра; 7 – компьютер.

Результаты экспериментальных исследований и их сравнение с расчетом МКЭ в программном комплексе *Ansys* приведены в таблице 5.4. Из представленных в таблице 5.4 результатов видно, что параметры, полученные по результатам расчета МКЭ и экспериментальных исследований, имеют расхождение менее 5-10%. На рисунке 5.17 представлены кривые крутящего момента, полученные при расчете МКЭ в программном комплексе *Ansys* и экспериментальных исследованиях. Как видно из рисунка 5.17, кривые крутящего момента имеют расхождение не более 10%. Следует отметить, что внешнее магнитное поле на

поверхности корпуса дискового двигателя составляет 0,003 Тл. Это связано с магнитной сборкой Хальбаха на дисковых роторах; данное внешнее магнитное поле необходимо экранировать.



Рисунок 5.14 – Экспериментальная установка с дисковым двигателем



Рисунок 5.15 – Система управления двигателем и система электроснабжения

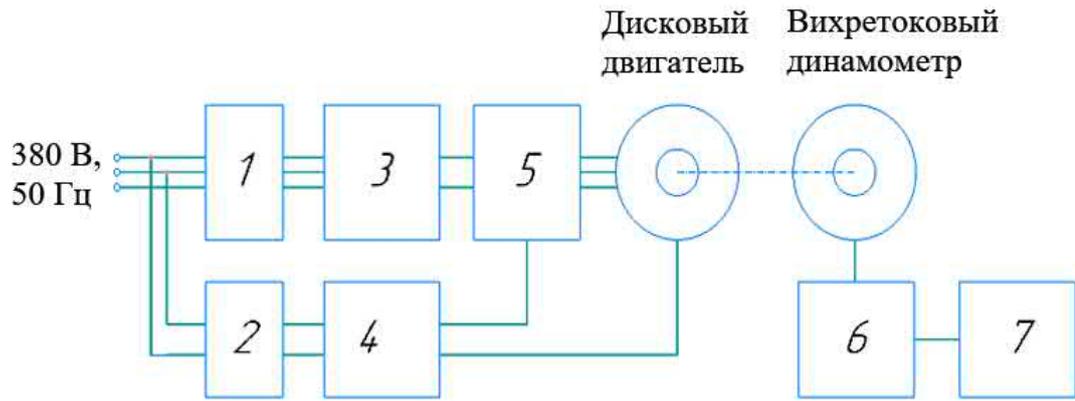


Рисунок 5.16 – Функциональная схема экспериментальной установки

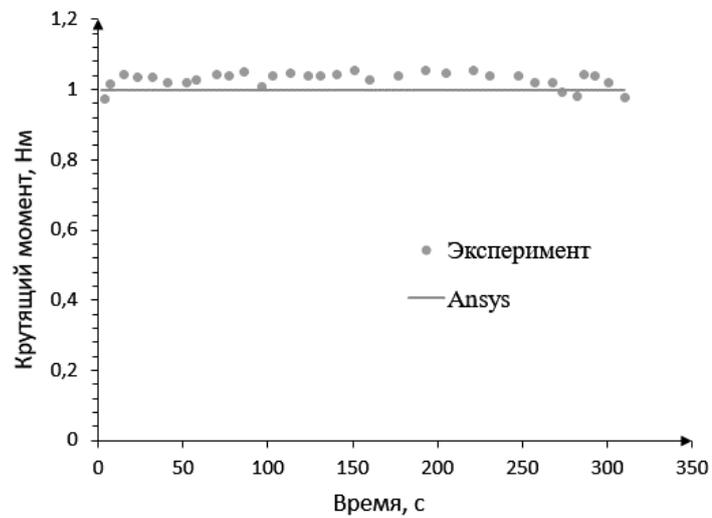


Рисунок 5.17 – Временные зависимости крутящего момента

Таблица 5.4 – Результаты испытаний и их сравнение с расчетом МКЭ

Параметр	Величина	
	Испытания	Расчет МКЭ
Частота вращения, об/мин	3000	
Напряжение питания, В	17	
Выходная мощность, кВт	0,31	
Сила тока в фазе (пиковая), А	40	43
Противо-ЭДС, В	11,6	12
КПД, %	86	80
Активное сопротивление фазы, Ом	0,009	0,0085
Индуктивность фазы, мкГн	5	5,3

Выводы к главе 5

1. На основании теоретических положений, изложенных в данной работе, был спроектирован и изготовлен макетный образец безжелезного дискового ЭД с магнитной сборкой Хальбаха. Разработана программа и методика испытаний дискового ЭД.

2. Результаты экспериментальных исследований дискового ЭД показали, что параметры, полученные по экспериментальным исследованиям и численному компьютерному моделированию, имеют максимальное расхождение менее 10%. Экспериментальные исследования показали высокую сходимость с результатами расчета дисковой ЭМ, что подтверждает достоверность сформулированной методики проектирования и разработанных численных компьютерных моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертации, позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Проведен анализ современного состояния и перспектив использования дисковых ЭМ в авиационной отрасли. Установлено, что дисковые ЭМ обладают наибольшими преимуществами в качестве привода воздушного винта благодаря высоким энергетическим характеристикам, эффективности воздушного охлаждения и возможности встраивания в приводные системы без существенного увеличения осевых габаритов.

2. Разработаны элементы методики проектирования безжелезных дисковых ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха позволяющие определить основные размеры и обмоточные данные для последующего построения компьютерной модели и расчета МКЭ.

3. По результатам компьютерного моделирования дисковых ЭМ различных конструкций установлено, что безжелезная конструкция дисковой ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха обладает на 21-35% меньшей массой относительно других конструкций.

4. Разработана компьютерная модель безжелезной дисковой ЭМ с элементами параметрической оптимизации магнитной сборки Хальбаха, позволяющая улучшать энергетические характеристики проектируемых дисковых ЭМ. Установлено, что увеличение углового размера тангенциально намагниченных ПМ на 50% позволяет повысить величину индукции в воздушном зазоре на 20%, что ведет к увеличению энергоэффективности ЭМ.

5. Из анализа применения ВТСП материалов в ЭМ установлено, что применение ВТСП обмоток позволяет повысить величины плотности тока, линейной токовой нагрузки и тем самым повысить удельную мощность. Определены ограничения при использовании ВТСП материалов в составе обмоток ЭМ, одним из основных является зависимость токонесущей способности ВТСП от переменного внешнего магнитного поля.

6. Разработана компьютерная модель дисковой ЭМ с ВТСП обмотками и проведена параметрическая оптимизация размера паза статора по критерию минимальной индукции, действующей на ВТСП обмотку. Рекомендацией при проектировании ЭМ с ВТСП обмотками является увеличение высоты паза статора до 38% от начальной величины (определяемой размером криостата), что позволяет снизить индукцию, действующую на ВТСП обмотку на 12,8%.

7. На основании теоретических положений и практических рекомендаций, предложенных в диссертации, разработан макетный образец безжелезного дискового ЭД, а также разработана программа и методика испытаний. Сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментальных исследований показал расхождение менее 10%

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang X. et al. Large electric machines for aircraft electric propulsion // IET Electr. Power Appl. Institution of Engineering and Technology, 2018. Vol. 12, № 6. P. 767–779.
2. Filipenko M. et al. Comparative analysis and optimization of technical and weight parameters of turbo-electric propulsion systems // Aerospace. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 7, № 8.
3. Gnadt A.R. et al. Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft // Progress in Aerospace Sciences. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 105. P. 1–30.
4. Fioriti M. Innovative concepts of electric system architectures and hybrid propulsion system for regional turboprop aircraft // Int. Rev. Aerosp. Eng. Praise Worthy Prize S.r.l, 2018. Vol. 11, № 3.
5. Zhang Z. et al. Feasibility of a New Ironless-stator Axial Flux Permanent Magnet Machine for Aircraft Electric Propulsion Application // China Electrotech. Soc. Trans. Electr. Mach. Syst. Electrical Engineering Press Co. Ltd., 2019. Vol. 3, № 1. P. 30–39.
6. Deisenroth D.C., Ohadi M. Thermal management of high-power density electric motors for electrification of aviation and beyond // Energies. MDPI AG, 2019. Vol. 12, № 19.
7. Jang J.H., Ahn S.H. Technical development trends review of futuristic personal air vehicle applications // Int. Rev. Mech. Eng. Praise Worthy Prize, 2019. Vol. 13, № 4. P. 242–248.
8. Henke M. et al. Challenges and Opportunities of Very Light High-Performance Electric Drives for Aviation // Energies. MDPI AG, 2018. Vol. 11, № 2. P. 344.
9. Duffy M. et al. Propulsion Scaling Methods in the Era of Electric Flight // 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, EATS 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018.
10. Оптимизация конструктивных схем стартер-генератора для транспортных средств с гибридной силовой установкой / Ф. Р. Исмагилов, Л. Э. Рогинская, В. И. Бекузин [и др.] // Электротехника. – 2018. – № 1. – С. 8-11.

11. Madonna V., Giangrande P., Galea M. Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities // IEEE Trans. Transp. Electrification. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. Vol. 4, № 3. P. 646–659.
12. Belmonte D., Dalla Vedova M.D.L., Maggiore P. Prognostics of Onboard Electromechanical Actuators: a New Approach Based on Spectral Analysis Techniques // Int. Rev. Aerosp. Eng. Praise Worthy Prize S.r.l, 2018. Vol. 11, № 3. P. 96.
13. Giangrande P. et al. Design and Testing of PMSM for Aerospace EMA Applications // IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2018. P. 2038–2043.
14. Ismagilov F.R. et al. Optimizing the Structural Designs of Starter Generators for Hybrid Powertrain Vehicles // Russ. Electr. Eng. 2018. Vol. 89, № 1.
15. Ismagilov F. et al. Design aspects of a high-speed high-voltage pmsm for aerospace application // Int. Rev. Aerosp. Eng. Praise Worthy Prize S.r.l, 2017. Vol. 10, № 3. P. 122–130.
16. Dalla Vedova M.D.L., Berri P.C. Optimization techniques for prognostics of on-board electromechanical servomechanisms affected by progressive faults // Int. Rev. Aerosp. Eng. Praise Worthy Prize S.r.l, 2019. Vol. 12, № 4. P. 160–170.
17. Bravo G.M., Praliyev N., Veress Á. Performance analysis of hybrid electric and distributed propulsion system applied on a light aircraft // Energy. 2021. Vol. 214. P. 118823.
18. Shibuya Y. et al. Flight Optimization Model on Global and Interval Ranges for Conceptual Studies of MEA Systems // SAE Technical Papers. SAE International, 2019. Vol. 2019-September, № September.
19. Qiao G. et al. A review of electromechanical actuators for More/All Electric aircraft systems // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. SAGE Publications Ltd, 2018. Vol. 232, № 22. P. 4128–4151.
20. Fault-Tolerant Multiphase Electric Generator Integrated in the Power Plant of an Aircraft / J. Kammermann, I. Bolvashenkov, H. G. Herzog [et al.] // 2021 16th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2021 :

- 16, Monte-Carlo, 05–07 мая 2021 года. – Monte-Carlo, 2021. – P. 9456598. – DOI 10.1109/EVER52347.2021.9456598.
21. Palmieri M. et al. Wind Micro-Turbine Networks for Urban Areas: Optimal Design and Power Scalability of Permanent Magnet Generators // *Energies*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018. Vol. 11, № 10. P. 2759.
22. Boggero L. et al. On-Board Systems Preliminary Sizing in an Overall Aircraft Design Environment // 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017.
23. Brando G. et al. Electric steering for aircraft nose landing gears using axial-flux permanent-magnet motors // *Proceedings - 2016 22nd International Conference on Electrical Machines, ICEM 2016*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. P. 761–767.
24. Brando G. et al. A direct drive solution for contra-rotating propellers in electric unmanned aerial vehicle // *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, ESARS*. IEEE Computer Society, 2015. Vol. 2015-May.
25. Moghaddam R.R. High speed operation of electrical machines, a review on technology, benefits and challenges // 2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. P. 5539–5546.
26. Gerada D. et al. High-speed electrical machines: Technologies, trends, and developments // *IEEE Trans. Ind. Electron.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. Vol. 61, № 6. P. 2946–2959.
27. El-Refaie A., Osama M. High specific power electrical machines: A system perspective // *CES Trans. Electr. Mach. Syst.* Electrical Engineering Press Co. Ltd., 2019. Vol. 3, № 1. P. 88–93.
28. El-Refaie A.M. Motors/generators for traction/propulsion applications: A review // *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2013. Vol. 8, № 1. P. 90–99.
29. Kakosimos P.E. et al. Induction motors versus permanent-magnet actuators for aerospace applications // *IEEE Trans. Ind. Electron.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. Vol. 61, № 8. P. 4315–4325.

30. Fodorean D. et al. Comparison of the main types of fault-tolerant electrical drives used in vehicle applications // SPEEDAM 2008 - Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion. 2008. P. 895–900.
31. Shihua W., Liwei S., Shumei C. Study on improving the performance of permanent magnet wheel motor for the electric vehicle application // IEEE Trans. Magn. 2007. Vol. 43, № 1. P. 438–442.
32. Fei W. et al. Design improvement of outer-rotor permanent magnet flux switching machine for direct-drive urban electric vehicle propulsion // IECON Proc. (Industrial Electron. Conf. 2013. P. 7319–7324.
33. EL-Refaie A.M. Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges // IEEE Trans. Ind. Electron. 2010. Vol. 57, № 1. P. 107–121.
34. Mohd Jamil M.L. et al. Electromagnetic performance due to tooth-tip design in fractional-slot PM brushless machines // Int. J. Power Electron. Drive Syst. Institute of Advanced Engineering and Science, 2015. Vol. 6, № 4. P. 860–868.
35. El-Refaie A.M., Jahns T.M., Novotny D.W. Analysis of surface permanent magnet machines with fractional-slot concentrated windings // IEEE Trans. Energy Convers. 2006. Vol. 21, № 1. P. 34–43.
36. Reddy P.B. et al. Comparison of interior and surface PM machines equipped with fractional-slot concentrated windings for hybrid traction applications // IEEE Trans. Energy Convers. 2012. Vol. 27, № 3. P. 593–602.
37. Goudarzi N., Zhu W.D. A review on the development of wind turbine generators across the world // Int. J. Dyn. Control. Springer Berlin Heidelberg, 2013. Vol. 1, № 2. P. 192–202.
38. Bilyi V., Gerling Di. Design of high-efficiency interior permanent magnet synchronous machine with stator flux barriers and single-layer concentrated windings // Proc. - 2015 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2015. 2016. P. 1177–1183.
39. Huang X. et al. A Brushless DC motor design for an aircraft electro-hydraulic actuation system // 2011 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. 2011. № June 2015. P. 1153–1158.

40. Ismagilov, F. R. Analysis of performance of disc-type high-speed generators design with PMs / F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, I. F. Sayakhov // Proceedings - 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018, Moscow, 15–18 мая 2018 года. – Moscow, 2018. – P. 8728891. – DOI 10.1109/ICIEAM.2018.8728891.
41. Duffy K.P. Optimizing Power Density and Efficiency of a Double-Halbach Permanent-Magnet Ironless Axial Flux Motor // 52nd AIAA/SAE/ASEE Jt. Propuls. Conf. 2016. P. 1–12.
42. Yang Y.P., Shih G.Y. Optimal design of an axial-flux permanent-magnet motor for an electric vehicle based on driving scenarios // Energies. 2016. Vol. 9, № 4.
43. Анализ производительности конструкций дисковых высокоскоростных генераторов / В. Е. Вавилов, Ф. Р. Исмагилов, И. Ф. Саяхов, Е. А. Ематин // Авиакосмическое приборостроение. – 2019. – № 8. – С. 3-12. – DOI 10.25791/aviakosmos.08.2019.814.
44. Исмагилов, Ф. Р. Обзор конструкций дисковых электромеханических преобразователей энергии для различных областей применения / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, И. Ф. Саяхов // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 1(38). – С. 68-79. – DOI 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-68-79.
45. HOME - LaunchPoint EPS An aerospace propulsion and power generation company [Electronic resource]. URL: <https://launchpointeps.com/> (accessed: 22.03.2022).
46. EMRAX | Axial flux e-motors | lightweight | powerful - EMRAX [Electronic resource]. URL: <https://emrax.com/> (accessed: 22.03.2022).
47. YASA | Electric Motor Manufacturers | Automotive OEM | YASA Ltd [Electronic resource]. URL: <https://www.yasa.com/> (accessed: 22.03.2022).
48. Magnax Yokeless Axial Flux Technology [Electronic resource]. URL: <https://www.magnax.com/home> (accessed: 22.03.2022).
49. Sanabria von Walter C. Design of high-torque-density synchronous drives for propulsion of rotary-wing aircraft // Delft University of Technology. 2016.

50. Mellor P. et al. Electrical machine technologies for an electric tail rotor drive. 2015. P. ERF2015_0150.
51. Melo S.P. et al. Life cycle engineering of future aircraft systems: The case of eVTOL vehicles // *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 2020. Vol. 90. P. 297–302.
52. Саяхов, И. Ф. Электромеханический привод для системы управления летательного аппарата / И. Ф. Саяхов // *Электротехнические комплексы и системы: Материалы Международной научно-практической конференции, Уфа, 24 октября 2018 года.* – Уфа: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2018. – С. 50-53.
53. Xu L., Xu Y., Gong J. Analysis and optimization of cogging torque in yokeless and segmented armature axial-flux permanent-magnet machine with soft magnetic composite core // *IEEE Trans. Magn.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. Vol. 54, № 11.
54. Guo Y.G., Zhu J.G. Applications of soft magnetic composite materials in electrical machines: A review // *Aust. J. Electr. Electron. Eng.* 2006. Vol. 3, № 1. P. 37–46.
55. Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F. The electromagnetic and thermal analysis of electrical machines from composite materials // *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production, SED 2019 - Proceedings.* 2019.
56. Yang Y.P., Jiang J.M. Optimal design of an axial-flux permanent-magnet middle motor integrated in a cycloidal reducer for a pedal electric cycle // *Energies.* 2015. Vol. 8, № 12. P. 14151–14167.
57. Исмагилов, Ф. Р. Диагностика композитных материалов в электрических машинах / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, И. Ф. Саяхов // *Электротехнические системы и комплексы.* – 2019. – № 2(43). – С. 65-69. – DOI 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-65-69.
58. Sayakhov I., Shemelin D. Diagnosis of Composite Materials in Electrical Machines // *Proceedings - ICOECS 2019: 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems.* 2019.
59. Edward Down, David Stout, David Minke. (2005). Composite generator rotor shaft. Patent US20070006445A1.

60. Piet Van Dine, Vladimir Odessky, Brian E. Spencer, James S. Smith, William R. Harring, (1997). Patent US6125528.
61. Kim, S.S., Lee, D.G., (2006), Design of the hybrid composite journal bearing assembled by interference fit, *Composite Structures*, Bd. 75, 1-4, pp. 222–230.
62. Cho, H.D., Lee, D.G., Choi, J.H., (1997), Manufacture of one-piece automotive drive shafts with aluminum and composite materials, *Composite Structures*, Volume 38, Issue 1-4, pp. 309-319, [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223\(97\)00065-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223(97)00065-2).
63. Fleischer, J., Koch, S.F., Coutandin, S., Manufacturing of polygon fiber reinforced plastic profiles by rotational molding and intrinsic hybridization, *S. Prod. Eng. Res. Devel.* (2015) 9: 317. doi:10.1007/s11740-015-0620-0.
64. Review of the application of composite materials in electrical machines / F. Ismagilov, V. Vavilov, I. Sayakhov, N. Uzhegov // *International Review of Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 15. – No 1. – P. 31-40. – DOI 10.15866/iree.v15i1.17601.
65. Подгузов, А. А. Аналитика электрических машин из композитных материалов / А. А. Подгузов, И. Ф. Саяхов // *Гагаринские чтения - 2020 : Сборник тезисов докладов, Москва, 27 декабря 2019 года – 17 2020 года. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. – С. 573.*
66. Acquaviva A., Skoog S., Thiringer T. Manufacturing of tooth coil winding PM machines with in-slot oil cooling // *Proc. - 2020 Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2020*. 2020. P. 2314–2320.
67. Schiefer, M., Doppelbauer, M., Indirect slot cooling for high power density machines with concentrated winding, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, pp. 1820-1825, 2015.
68. SciMo – Electric High Performance Motors, http://www.sci-mo.de/de/home_en/, дата 01.06.17.
69. Xu, Z., La Rocca, A., Arumugam, P., Pickering, S. J., Gerada, C., Bozhko, S., Gerada, D., Zhang, H., A semi-flooded cooling for a high speed machine: Concept, design and practice of an oil sleeve. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* 29 Oct.-1 Nov. 2017.

70. Garibaldi, M., Gerada, C., Ashcroft, I., Hague, R., Morvan, H., The Impact of Additive Manufacturing on the Development of Electrical Machines for MEA Applications: A Feasibility Study, in More Electric Aircraft Conference, Toulouse, France, Feb. 2015.
71. Krings A. et al. Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines // IEEE Trans. Ind. Electron. 2017. Vol. 64, № 3. P. 2405–2414.
72. Washington J.G., Pompermaier C., Sjöberg L. Application of the latest Soft Magnetic Composites to a Hybrid Brushless DC Motor for a Compressor Application // 22nd SMM Conf. 2015. № September 2016.
73. Krings A. et al. Characteristics comparison and selection guide for magnetic materials used in electrical machines // 2015 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. 2015. Vol. 23. P. 1152–1157.
74. Ismagilov F.R. et al. High-speed Electrical Machine with Radial Magnetic Flux and Stator Core Made of Amorphous Magnetic Material . Technologies , Trends and Perspective of Development. 2018. Vol. 86, № May. P. 69–82.
75. Zhang C. et al. Development of a high-speed permanent magnet machine using amorphous alloy cores. 2016.
76. Nesimi Ertugrul, Ryusuke Hasegawa, Wen L. Soong¹, John Gayler, Stephen Kloeden, Solmaz Kahourzade, A Novel Tapered Rotating Electrical Machine Topology Utilizing Cut Amorphous Magnetic Material. IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 51, No. 7, July 2015 8106006.
77. Pyrhönen J. et al. Replacing copper with new carbon nanomaterials in electrical machine windings // Int. Rev. Electr. Eng. 2015. Vol. 10, № 1. P. 12–21.
78. Mayhew E., Prakash V. Thermal conductivity of high performance carbon nanotube yarn-like fibers // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115, № 17.
79. Kurth K.H., Drummer D. Improvement of the magnetic properties of injection molded polymer bonded magnets // 2013 3rd International Electric Drives Production Conference, EDPC 2013 - Proceedings. IEEE, 2013. P. 1–5.
80. Domingo-Roca R., Jackson J.C., Windmill J.F.C. 3D-printing polymer-based permanent magnets // Mater. Des. Elsevier, 2018. Vol. 153. P. 120–128.

81. Электромагнитный и тепловой анализ электрических машин из композитных материалов / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, И. Ф. Саяхов, Е. А. Ематин // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2020. – № 2. – С. 52-61. – DOI 10.24160/1993-6982-2020-2-52-61.
82. Исмагилов, Ф. Р. К вопросу применения композитных материалов в электрических машинах (обзор) / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, И. Ф. Саяхов // Новое в российской электроэнергетике. – 2018. – № 9. – С. 17-32.
83. Оценка эффективности полностью композитных электрических машин / Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов, И. Ф. Саяхов, Р. А. Нургалиева // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Т. 61. – № 4. – С. 32-39. – DOI 10.17213/0136-3360-2018-4-32-39.
84. Ганджа, С. А. Оптимальное проектирование вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком / С. А. Ганджа // Вопросы электромеханики. – 2012. – № 1.
85. Ганджа, С. А. Инженерная методика проектирования вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком на основе номограмм по выбору основных размеров / С. А. Ганджа // Энергетик. – 2012. – № 2.
86. Шишкин Валерий Павлович, Казаков Юрий Борисович Определение ЭДС и главных размеров торцевых магнитоэлектрических генераторов с беспазовым сердечником статора и кольцевой обмоткой якоря // Вестник ИГЭУ. 2016. №3.
87. Шишкин Валерий Павлович, Казаков Юрий Борисович Методика выбора размеров активной части торцевых магнитоэлектрических генераторов с минимальными массогабаритными показателями // Вестник ИГЭУ. 2018. №4.
88. Gieras J.F., Wang R.J., Kamper M.J. Axial flux permanent magnet brushless machines (Second Edition) // Axial Flux Perm. Magn. Brushless Mach. (Second Ed. Springer Netherlands, 2008. P. 1–362.
89. Hendershot J.R., Miller T.J.E. Timothy J.E. Design of brushless permanent-magnet motors. Magna Pysics Pub., 1994.
90. Игнатов В.А., Вильданов К.Я. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления. - М.: Энергоатомиздат, 1988.

91. Latoufis K., Messinis G. Axial flux permanent magnet generator design for low cost manufacturing of small wind turbines // *Wind Eng.* 2012. Vol. 36, № 4. P. 411–432.
92. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Валитов А.И. Оптимизация геометрических размеров дискового генератора // *Энергетическое строительство.* 1994, № 1. С. 35-37.
93. Wang R. Design optimization of a single-sided axial flux permanent magnet in-wheel motor with double-layer non-overlap ... 2015. № May.
94. Huynh C., Zheng L., Acharya D. Losses in High Speed Permanent Magnet Machines Used in Microturbine Applications // *J. Eng. Gas Turbines Power.* 2009. Vol. 131, № 2. P. 022301.
95. Aleksashkin A., Mikkola A. Literature Review on Permanent Magnet Generators Design and Dynamic Behavior // *Mech. Eng.* 2008. Vol. 7. P. 30.
96. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, - 1985. - 168 с.
97. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. // М.: Высш.шк, - 1985. -255 с.
98. Вольдек А.И. Электрические машины. // Л., Энергия, - 1974.
99. Winter O., Kral C., Schmidt E. Design study of magnet shapes for axial Halbach arrays using 3D finite element analyses // *Proc. - 2012 20th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2012.* 2012. P. 2660–2665.
100. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конеев С.М.-А., Пенкин В. Т., Полтавец В.Н., Ильясов Р.И., Дежин Д. С. Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников / Под ред. Л.К. Ковалева, К.Л. Ковалева, С.М.-А. Конеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010, 396 с.
101. Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Журавлев С.В., Тулинова Е.Е. Сверхпроводниковые электрические машины с улучшенными массогабаритными показателями // *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения). Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции.* 2019, с. 149-153.

102. Васич П.С., Дежин Д.С., Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Полтавец В.Н. Сверхпроводниковая электрическая машина с постоянными магнитами и массивными высокотемпературными сверхпроводниковыми элементами // Вестник МАИ, Т. 19, №2, 2012, с. 65–76.
103. Megawatt Electric Motors with High Temperature Superconductors / F. Ismagilov, V. Vavilov, R. Karimov [et al.] // Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, Ufa, 27–30 октября 2020 года. – Ufa, 2020. – P. 9278488. – DOI 10.1109/ICOECS50468.2020.9278488.
104. Han-Wook Cho, Kiruba S. Haran. Force Analysis of Superconducting Coils in Actively Shielded Air-Core Superconducting Machines. IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 28, №. 5, August 2018.
105. СуперОкс [Electronic resource]. URL: <https://www.superox.ru/> (accessed: 22.03.2022).

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «ЭТК»

Шарипова Г.Ш.

2022 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Саяхова И.Ф. на тему «Разработка безжелезных дисковых электрических машин с магнитной сборкой Хальбаха для летательных аппаратов» в производственный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Саяхова И.Ф. на тему «Разработка безжелезных дисковых электрических машин с магнитной сборкой Хальбаха для летательных аппаратов» используются в производственном процессе, а именно:

— Элементы методики проектирования безжелезных дисковых электрических машин, заключающиеся в предварительном расчете основных размеров и обмоточных данных для последующего построения компьютерной модели и расчета методом конечных элементов.

— Методика и результаты параметрической оптимизации постоянных магнитов в магнитной сборке Хальбаха с использованием разработанной компьютерной модели безжелезной дисковой электрической машины.

Технический директор,
главный конструктор ООО «ЭТК»

В.Е. Вавилов

Начальник отдела расчета
электрических машин ООО «ЭТК»

А.А. Жеребцов