

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Самара 2023

Работа выполнена на кафедре электромеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Научный руководитель: **Исмагилов Флюр Рашитович**,
доктор технических наук, профессор кафедры
электромеханики Уфимского университета науки
и технологий

Официальные оппоненты: **Ганджа Сергей Анатольевич**,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электропривод, мехатроника и
электромеханика» ФГАОУ ВО «Южно-
Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Князев Алексей Сергеевич,
кандидат технических наук, старший
преподаватель 15 кафедры авиационного и
радиоэлектронного оборудования ФГКВБОУ ВО
«Краснодарское высшее военное авиационное
училище лётчиков имени Героя Советского
Союза А.К. Серова»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «21» марта 2023 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.06 по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18) и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» <http://d24237706.samgtu.ru/>

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.377.06
кандидат технических наук



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В аэрокосмической отрасли использование гибридной силовой установки (ГСУ) или электрической силовой установки (ЭСУ) является одним из перспективных направлений. Однако электрические машины (ЭМ), применяемые в ГСУ и ЭСУ на летательных аппаратах (ЛА) должны обладать высокими энергетическими характеристиками и удельной мощностью для экономии топлива и заряда батарей.

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. При этом наибольшей перспективой обладают безжелезные дисковые ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха, благодаря возможности достижения высокой удельной мощности и создания эффективного воздушного охлаждения.

В связи с обозначенными преимуществами, проведение исследований по повышению энергетических характеристик безжелезных дисковых ЭМ с постоянными магнитами (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 (МКЭ).
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.

Содержание работы.

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 и определены ключевые вопросы, стоящие перед ЭМ для авиационной отрасли.

Проведен обзор электротехнических и конструкционных материалов, применяемых в дисковых ЭМ, а также оценены перспективы применения композитных материалов. Приведена классификация конструкций дисковых ЭМ и определены их особенности с примерами реализации в ЛА. Наибольший интерес представляет конструкция дисковой ЭМ без металлического сердечника статора и со сборкой Хальбаха на роторе (рисунок 1).

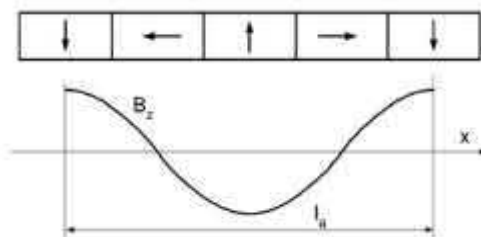


Рисунок 1 – Магнитная сборка Хальбаха

Такая конструкция дисковой ЭМ может быть спроектирована с наибольшей удельной мощностью, что является важным при использовании данных ЭМ в авиационной отрасли. Поэтому исследования по повышению

энергетических характеристик данной конструкции дисковой ЭМ представляют значительный интерес.

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. Установлено, что выражение (1) имеет высокую сходимость с результатами расчетов МКЭ.

$$M_{cp} = 2\pi B_{cp} A R_{внеш}^3 (\lambda - \lambda^3). \quad (1)$$

где M_{cp} – средний крутящий момент, B_{cp} – средняя индукция в воздушном зазоре, $D_{внеш}$ – внешний диаметр статора/ротора, $D_{внут}$ – внутренний диаметр статора/ротора, λ – соотношение внешнего и внутреннего диаметров $\lambda = D_{внут} / D_{внеш}$, $R_{внеш} = D_{внеш} / 2$ – внешний радиус статора/ротора, A – линейная токовая нагрузка.

Представлены рекомендации по выбору числа пар полюсов и числа катушек статора. Приведены расчеты обмотки статора: размеры катушек, расчет обмоточных коэффициентов. Допустимые комбинации числа пазов и полюсов описываются формулами (2), (3):

$$z = 2p \pm 1; \quad (2)$$

$$z = 2p \pm 2. \quad (3)$$

где z – число пазов статора, p – число пар полюсов.

Использование выражения (2) приводит к нечетному количеству катушек на фазу, что ограничивает возможности последовательного и параллельного соединения катушек.

Приведены выражения для определения геометрических размеров ПМ (4)-(6), через величину магнитной индукции в воздушном зазоре и характеристики ПМ. На рисунке 2 приведена геометрия ПМ.

$$h_{ПМ} = \frac{B_{cp}}{B_r} \frac{\alpha\pi}{2p} (R_{внеш} + R_{внут}); \quad (4)$$

$$W_{внеш} = \frac{\pi D_{внеш}}{2p} \alpha ; \quad (5)$$

$$W_{внут} = \frac{\pi D_{внут}}{2p} \alpha . \quad (6)$$

где B_r – остаточная магнитная индукция ПМ, α – коэффициент, показывающий какую часть от полюсного деления составляет ПМ, p – число пар полюсов, $R_{внеш}$ – внешний радиус статора/ротора, $R_{внут}$ – внутренний радиус статора/ротора.

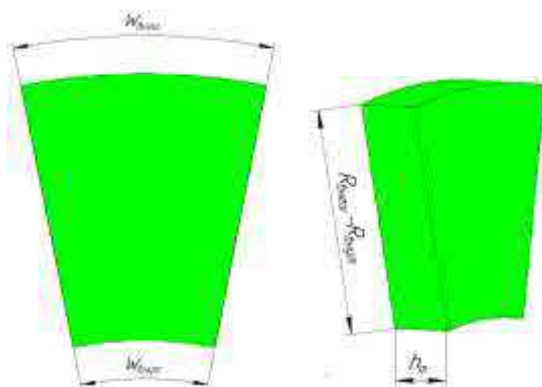


Рисунок 2 – Геометрия ПМ

Ограничивающими факторами при аналитическом расчете дисковой ЭМ являются: максимальная индукция в воздушном зазоре, плотность тока в обмотках и линейная токовая нагрузка

Результатами расчета являются габариты активной части ЭМ, размеры ПМ и катушек, обмоточные данные. Данные результаты используются для последующего моделирования численными методами с применением компьютерных моделей. Это позволяет ускорить процесс проектирования с получением точного решения.

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.

Проведены расчеты пяти вариантов конструкций дисковых ЭМ в двигательном режиме работы с номинальной мощностью 100 кВт, частотой вращения 3200 об/мин, при идентичных габаритных размерах и электромагнитных нагрузках:

- Вариант №1 с одним ротором и одним статором;
- Вариант №2 с одним ротором со сборкой Хальбаха и одним статором;
- Вариант №3 с двумя роторами и сегментированным сердечником статора без ярма;
- Вариант №4 с двумя роторами со сборками Хальбаха и сегментированным сердечником статора без ярма;
- Вариант №5 с двумя роторами со сборками Хальбаха и без сердечника статора.

Согласно результатам электромагнитных расчетов, конструкция №5 обладает наименьшей массой активных частей в 48,1 кг, что меньше чем массы конструкции №1 на 35%, конструкции №2 – 33%, конструкции №3 – 24%, конструкции №4 – 21%. На рисунке 3 приведена гистограмма массы активной части конструкций дисковых ЭМ. Таким образом, безжелезная дисковая ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха обладает наибольшим значением удельной мощности среди рассмотренных конструкций.

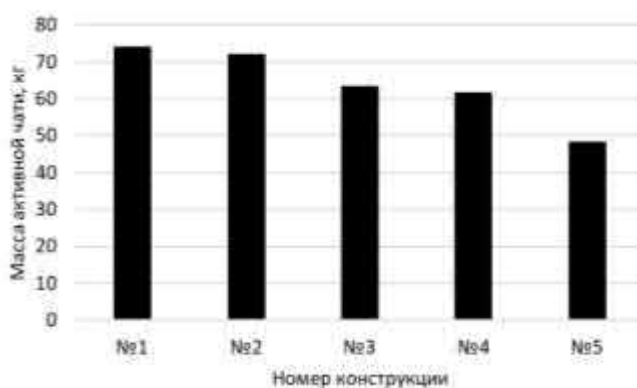


Рисунок 3 – Масса активной части конструкций дисковых ЭМ

С применением компьютерной модели, проведена параметрическая оптимизация энергетических параметров безжелезной дисковой ЭМ с

магнитной сборкой Хальбаха. На рисунке 4 изображен эскиз магнитной сборки Хальбаха.

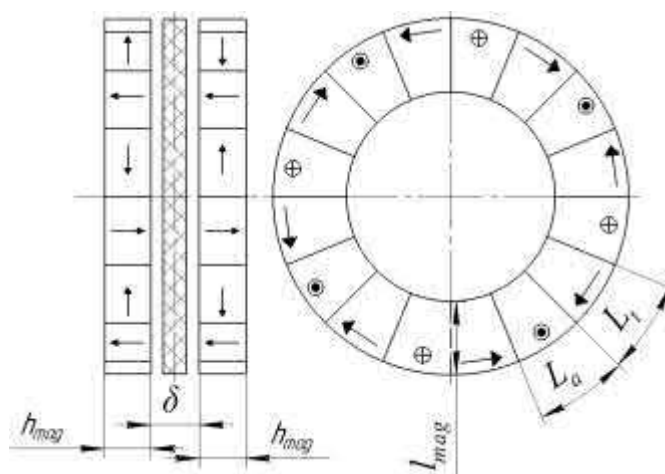


Рисунок 4 – Эскиз магнитной сборки Хальбаха

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:

$$B_m^* = f(L_t^*) = \max, \text{ при } h_{mag} = const, l_{mag} = const, \delta = const. \quad (7)$$

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

$$L_t^* = L_t / L_{t0}, \quad (8)$$

где L_i – измененный угловой размер тангенциально намагниченного ПМ, L_{i0} – первоначальный угловой размер тангенциально намагниченного ПМ.

Изменение угловых размеров ПМ магнитной сборки Хальбаха приведено на рисунке 5.

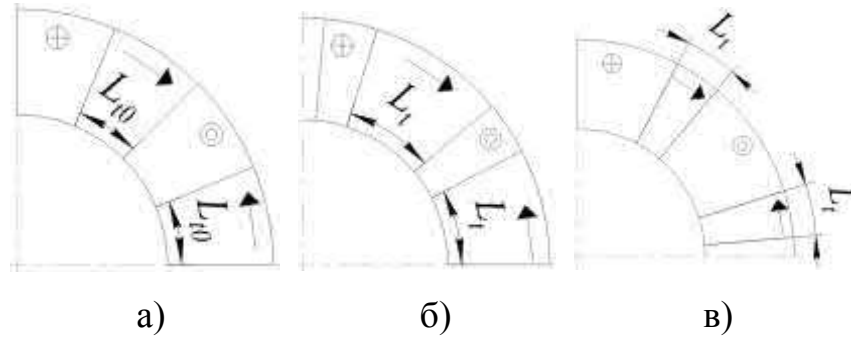


Рисунок 5 – Изменение угловых размеров ПМ магнитной сборки Хальбаха

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

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:

$$L_a^* = 2 - L_i^*, \quad (9)$$

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

$$B_m^* = B_m / B_{m0}, \quad (10)$$

где B_{m0} – величина максимальной индукции при L_{i0} , B_m – величина максимальной индукции при L_i .

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 6)

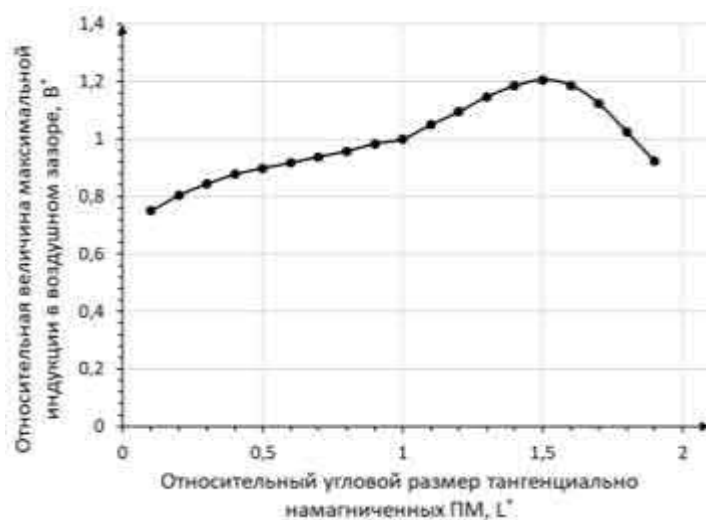


Рисунок 6 – Кривая зависимости относительной величины максимальной индукции в воздушном зазоре от относительного углового размера тангенциально намагниченных ПМ

Как видно из рисунка 6, 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:

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

- размеры криостата, в котором располагается ВТСП обмотка, существенно влияет на коэффициент заполнения паза статора и, соответственно, энергетические характеристики ЭМ.

- существует минимальный радиус изгиба, при котором может функционировать ВТСП лента.

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. Расчеты трех конструкций показали, что масса активной части ЭМ со сборкой Хальбаха (без сердечника на роторе) на 35% ниже чем у ЭМ со стандартной магнитной системой ротора и на 16% ниже чем у ЭМ с беспазовым статором.

С применением разработанной компьютерной модели была проведена параметрическая оптимизация паза статора дисковой ЭМ с ВТСП обмотками и со сборками Хальбаха на роторе. На рисунке 7 приведен эскиз пазовой зоны дисковой ЭМ с ВТСП обмотками с учетом размеров криостата.

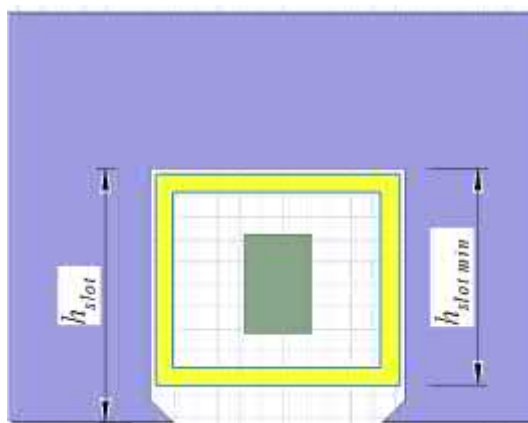


Рисунок 7 – Эскиз пазовой зоны дисковой ЭМ с ВТСП обмотками

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 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:

$$B_{\min} = f(h_{\text{slot}}) = \min, \text{ при } h_{\text{slotmin}} = \text{const}. \quad (11)$$

В процессе решения оптимизационной задачи построена зависимость величины индукции переменного магнитного поля, действующей на ВТСП обмотку, от высоты паза статора (рисунок 8).

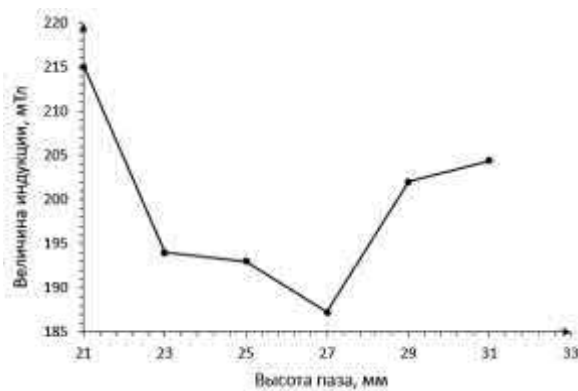


Рисунок 8 – Зависимость величины индукции, действующей на ВТСП обмотку, от высоты паза статора

Из рисунка 8 можно видеть, 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 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. На рисунке 9 представлены фотографии безжелезного статора и двух роторов макетного образца дискового ЭД.

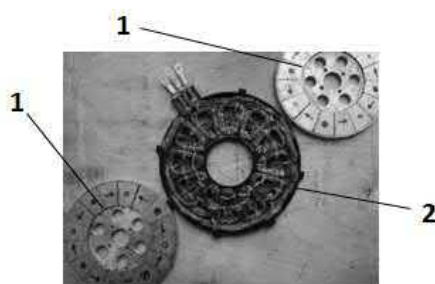


Рисунок 9 – Безжелезный статор и два ротора макетного образца дискового ЭД

На рисунке 9: 1 – ротор с магнитной сборкой Хальбаха, 2 – безжелезный статор. Измерения параметров дискового ЭД проводились на экспериментальной установке, представленной на рисунке 10а. На рисунке 10б приведена функциональная схема экспериментальной установки.

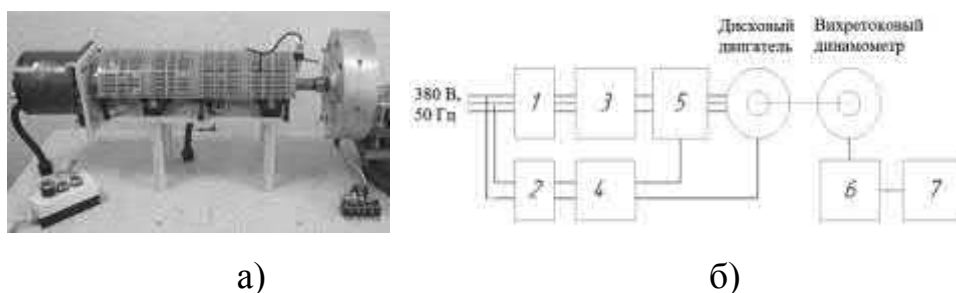


Рисунок 10 – Экспериментальная установка

а) внешний вид; б) функциональная схема

На рисунке 10б: 1 – автотрансформатор; 2 – источник питания 12В постоянного тока; 3 – выпрямитель; 4 – система управления; 5 – автономный

инвертор напряжения; 6 – контроллер вихретокового динамометра; 7 – компьютер.

Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys приведены в таблице 1. На рисунке 11 представлены кривые крутящего момента.

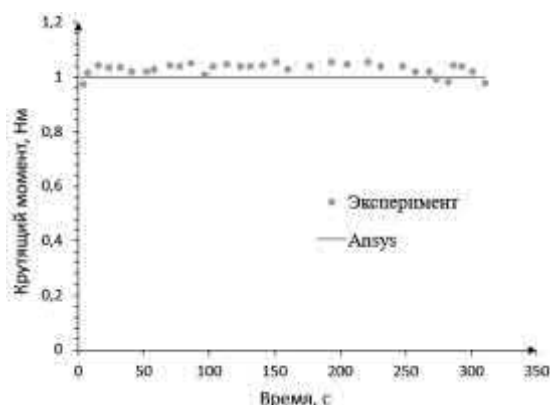


Рисунок 11 – Кривые крутящего момента

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys

Параметр	Величина	
	Эксперимент	Ansys
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
Активное сопротивление фазы, Ом	0,009	0,0085
Индуктивность фазы, мкГн	5	5,3

Из результатов, представленных в таблице 1 и рисунке 8 видно, что параметры, полученные по экспериментальным исследованиям и компьютерному моделированию, имеют максимальное расхождение менее 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе:

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 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 их 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 28% 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%.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России:

1. Саяхов И.Ф. 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.

2. Саяхов И.Ф. 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.

3. Саяхов И.Ф. 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.

4. Саяхов И.Ф. Оптимизация конструктивных схем стартер-генератора для транспортных средств с гибридной силовой установкой / Ф.Р. Исмагилов, Л.Э. Рогинская, В.И. Бекузин, А.Х. Минияров, И.Ф. Саяхов // Электротехника. – 2018. – № 1. – С. 8–11.

Публикации, включенные в международную базу цитирования Scopus:

5. Sayakhov I.F. Analysis of performance of disc - type high – speed generators design with PMs / F.R. Ismagilov, V. E. Vavilov, I.F. Sayakhov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, (ICIEAM 2018), Москва, 15–18 мая 2018 г.

6. Sayakhov I. Review of the application of composite materials in electrical machines International / F. Ismagilov, N. Uzhegov, V. Vavilov, I. Sayakhov // International Review of Electrical Engineering. – 2020. – Т. 15. – №1. – С 31–40.

7. Sayakhov I. Testing of high-torque electric motor for gearless electromechanical actuator / I. Sayakhov, G. Zinatullina // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, (ICOECS 2019), Уфа, 22–25 октября 2019 г.

8. Sayakhov I.F. The electromagnetic and thermal analysis of electrical machines from composite materials / F.R. Ismagilov, V.E. Vavilov, I.F. Sayakhov // International Seminar on Electron Devices Design and Production, (SED 2019), Прага, 23–24 апреля 2019 г.

9. Sayakhov I. Design and experimental investigation of BLDC motor for aircraft electromechanical actuator / F. Ismagilov, A. Zherebtsov, V. Vavilov, I. Sayakhov // International Review of Aerospace Engineering. – 2020. – Т. 13. – № 1. – С. 10–15.

10. Sayakhov I. Megawatt Electric Motors with High Temperature Superconductors / F. Ismagilov, V. Vavilov, A. Varyukhin, R. Karimov, E. Zharkov, I. Sayakhov // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, (ICOECS 2020), Уфа, 27–30 октября 2020 г.

Свидетельства о регистрации программы ЭВМ:

11. Расчет высокомоментного вентильного электродвигателя: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018661454 Рос. Федерация / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, И.Ф. Саяхов – заявлено 30.08.2018; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.09.2018.

12. Расчет дискового вентильного электродвигателя: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662259 Рос. Федерация / И.Ф. Саяхов – заявлено 10.09.2019; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.09.2019.

13. Расчет синхронного электродвигателя с постоянными магнитами: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662203 Рос. Федерация / И.Ф. Саяхов – заявлено 10.09.2019; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.09.2019.

Патенты на изобретения и полезные модели:

14. Пат. 2700280 РФ, МПК H02K 1/32, 1/20. Высокооборотный электромеханический преобразователь энергии с воздушным охлаждением (варианты) / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, И.Ф. Саяхов, А.Х. Минияров; заявитель и патентообладатель УГАТУ. – 2018116973; заявл. 07.05.2018; опубл. 16.09.2019, Бюл. № 26.

15. Пат. 2710037 РФ, МПК B64C 15/00, H02K 44/08. Система электроснабжения летательного аппарата / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин, И.Ф. Саяхов; заявитель и патентообладатель УГАТУ. – 2019108642; заявл. 25.03.2019; опубл. 24.12.2019, Бюл. № 36.

16. Пат. 2754498 РФ, МПК H02K 15/085, H02K 3/48, H02K 1/16. Изоляция паза статора электрической машины / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, Р.Д. Каримов, И.Ф. Саяхов, С.М. Хасанов, И.А. Кунсбаев, Е.Д. Пестерева, Р.Я. Халиуллин, А.А. Меднов; заявитель и патентообладатель ООО «ЭТК». – 2020138223; заявл. 23.11.2020; опубл. 02.09.2021, Бюл. № 25.

17. Пат. на полезную модель 200923, МПК H02K 21/02, H02K 1/16, H02K 1/20, H02K 1/27, H02K 5/02, H02K 5/16, H01F 1/08. Электрическая машина из композитных материалов / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, И.Ф. Саяхов; заявитель и патентообладатель УГАТУ. – 2020126797; заявл. 06.12.2019; опубл. 19.11.2020, Бюл. № 32.

Вклад автора в результаты работ, опубликованных в соавторстве [1-11, 14-17], состоит в участии в работах по созданию численных компьютерных моделей, аналитических расчетах, изготовлению и испытанию макетных образцов. Работы [12, 13] выполнены автором самостоятельно.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 3 от « 10 » января 2023 г.)

Заказ № . Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244