

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Саяхова Ильдуса Финатовича «Разработка безжелезных дисковых электрических машин с магнитной сборкой Хальбаха для летательных аппаратов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 - «Электротехнические комплексы и системы»

Актуальность темы исследования.

В настоящее время активно повышается степень электрификации самолётов, появляются более электрифицированные и полностью электрические самолёты. В связи с этим развиваются технологии гибридных силовых установок (ГСУ) и электрических силовых установок (ЭСУ). На данном этапе 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.

Одним из основных преимуществ дисковых ЭМ является малая аксиальная длина, что позволяет интегрировать их напрямую с приводом воздушного винта без риска увеличения габаритов ЛА.

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

В конструкции безжелезной дисковой ЭМ благодаря отсутствию магнитопровода упрощается технология создания статора, снижается масса. Использование магнитной сборки Хальбаха на роторе позволяет отказаться от стального ярма. Все это в целом позволяет создать дисковую ЭМ с малой аксиальной длиной и высокой удельной мощностью, что является важным показателем для использования на ЛА.

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

Оценка структуры и содержания 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 для летательных аппаратов. На основе обзора определены основные тенденции и направления развития ЭМ с высокими удельными характеристиками. Проведен обзор электротехнических и конструкционных материалов, применяемых в дисковых ЭМ. Проанализированы конструкции дисковых ЭМ, и определена перспективность их применения в ЛА. Приведена классификация конструкций дисковых ЭМ и определены их особенности с примерами реализации в ЛА.

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 метода конечных элементов (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). 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.

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. Проведено численное моделирование разных конструктивных исполнений дисковых ЭМ и определены наиболее эффективные варианты, позволяющие обеспечить максимально возможные энергетические характеристики. Проведена параметрическая оптимизация энергетических параметров безжелезной дисковой ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха.

В четвертой главе приведен обзор применения высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов в 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.

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 Electronics Desktop имеют максимальное расхождение менее 10%.

В заключении подведены итоги исследования и представлены его основные результаты.

Разделы диссертации структурированы четко, согласно тематике. Язык и стиль изложения, терминология соответствуют требованиям, предъявляемым к научной и научно-технической литературе.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

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

Новизна полученных результатов.

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.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов.

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.

Замечания по диссертационной работе.

1. В анализе конструкций ЭМ не определены количественные критерии, на основании которых отдано предпочтение дисковой ЭМ.

2. При расчетах методом конечных элементов в программном комплексе Ansys Electronics Desktop принято допущение, заключающееся в допустимости расчёта в 2D постановке (плоской модели), однако не приведено сравнения с результатами расчёта в 3D постановке (объёмной модели).

3. В 4 главе не представлено детальное описание конструкционной части дисковых ЭМ со сверхпроводниковыми обмотками, при этом рассматривается конструкция с магнитопроводом на статоре. Однако, в главе 3 представлена и исследована другая конструкция – с безжелезным магнитопроводом статора.

4. В работе не представлены расчёты дискового двигателя с магнитной сборкой Хальбаха для какого-нибудь конкретного типа ЛА.

Заключение.

Указанные недостатки не снижают научной ценности представленной диссертации в целом.

Диссертационная работа выполнена в полном объёме, представляет собой законченное исследование по актуальной теме. Содержание, объект и предмет исследований данной работы, а также научная новизна и выносимые на защиту положения соответствуют паспорту специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы». Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных

степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а её автор Саяхов Ильдус Финатович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент:

кандидат технических наук, старший преподаватель 15 кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования федерального государственного казённого военного образовательного учреждения высшего образования «Краснодарское высшее военное авиационное училище лётчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова»



Князев Алексей Сергеевич

«21» февраля 2023 г.

Кандидатская диссертация защищена
по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Адрес места работы: 350090, Краснодарский край,
г. Краснодар, ул. им. Дзержинского, д. 135.

Рабочий телефон: 8 (861) 992-80-52, доб. 29-15.

Адрес эл. почты: kvvaul@mil.ru

