

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

Развитие малой и беспилотной авиации в настоящее время приобрело особую значимость. Этот тип авиации для своих силовых установок все чаще применяет электрические приводы с вентильными машинами на постоянных магнитах. В настоящее время электрические машины, применяемые в гибридных силовых установках или электрических силовых установках на летательных аппаратах обладают недостаточно высокой удельной мощностью. При этом 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 летательных аппаратов.

Дисковые электрические машины уже находят широкое практическое применение в авиационной отрасли в качестве привода воздушного винта. При этом наибольшей перспективой обладают вентильные электрические машины с магнитной сборкой Хальбаха, благодаря возможности достижения высокой удельной мощности и создания эффективного воздушного охлаждения. Наличие мощных высококоэрцитивных магнитов и силовой электроники позволяют существенно улучшить удельные энергетические показатели, что важно для летательных аппаратов, но с точки зрения теории эти вопросы не проработаны. Представленная к защите диссертация решает ряд этих научных задач и поэтому представляет собой теоретический интерес и практическую значимость.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Работа изложена на 119 страницах, из них 109 страниц основного текста, включая 56 рисунков и 20 таблиц. Список использованной литературы включает 105 наименований.

Диссертация имеет следующую структуру и логику изложения.

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

В первой главе проведен обзор существующих вентильных машин с высокими удельными характеристиками для летательных аппаратов. На основе обзора определены основные тенденции и направления развития электрических машин с высокими удельными характеристиками. Проведен

обзор электротехнических и конструкционных материалов, применяемых в дисковых вентильных машинах. Проанализированы конструкции дисковых вентильных машин, и определена перспективность их применения в летательных аппаратах, приведена их классификация.

Во второй главе разработаны элементы методики проектирования дисковых вентильных машин с диамагнитным якорем, позволяющие получить начальное приближенное решение для последующего построения компьютерной модели и анализа с использованием метода конечных элементов. Приведены методы расчета крутящего момента, представлены рекомендации по выбору числа пар полюсов и числа сегментов статора, выведены 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 электрической машины в dq-системе координат.

В третьей главе разработаны компьютерные модели и проведены электромагнитные расчеты для выбранной конструкции 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. Проведено численное моделирование разных конструктивных исполнений дисковых ЭМ и определены наиболее эффективные варианты, позволяющие обеспечить максимально возможные энергетические характеристики. Проведена параметрическая оптимизация энергетических параметров диамагнитной дисковой ЭМ с магнитной сборкой Хальбаха.

В четвертой главе приведен обзор применения высокотемпературных проводниковых материалов в вентильных машинах, Разработаны компьютерные модели дисковых машин с этими материалами в двигательном режиме работы при номинальной мощности 60 кВт и частоте вращения 2000 об/мин. Сделан анализ конструкционных и электромагнитных ограничений высокотемпературных сверхпроводниковых материалов. С применением разработанной компьютерной модели была проведена параметрическая оптимизация паза статора дисковой вентильной машины с обмотками из высокотемпературных сверхпроводниковых материалов .

В пятой главе проведено экспериментальное исследование макетного образца диамагнитного дискового электродвигателя с магнитной сборкой Хальбаха. Разработана программа и методика испытаний дискового электродвигателя. Результаты экспериментальных исследований подтвердили точность компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys Electronics Desktop.

В заключении подведены итоги исследования и представлены его основные результаты.

Разделы диссертации имеют структуру и логику, отражают основное содержание работы. Язык и стиль изложения, терминология соответствуют требованиям, предъявляемым к научной и научно-технической литературе.

Научная новизна и теоретическая значимость

Основным научным результатом является дальнейшая разработка теории проектирования дисковых вентильных двигателей с нетипичной магнитной системой. Диссертант:

- разработал методику проектирования 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.

- выполнил параметрическую оптимизацию постоянных магнитов в магнитной сборке Хальбаха на основе компьютерной модели дисковой электрической машины, которая позволила выявить оптимальные соотношения размеров постоянных магнитов для улучшения массогабаритных и энергетических характеристик

- получил 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.

Полученные в работе математические модели и структурные схемы обладают достаточной общностью и могут быть использованы для исследования и проектирования различных типов аксиальных вентильных машин малой и средней мощности.

Достоверность результатов работы

Полученные научные результаты имеют высокую степень достоверности, поскольку получены были с применением хорошо проверенных методов анализа, таких как метод конечных элементов, методы натурного макетирования с использованием аттестованного оборудования для проведения экспериментов.

Основные выводы и рекомендации были подтверждены на практике при испытании опытного образца.

Практическая ценность результатов работы заключается прежде всего в создании конкретного опытного образца, который может быть прототипом серийных изделий. Полученные в работе исследования позволяют на уровне инженерной практики определить основные энергетические характеристики аксиальных вентильных машин. Диссертантом разработана методика проектирования диамагнитных дисковых вентильных машин, позволяющая определить габаритные размеры, геометрические размеры постоянных магнитов, катушек статора и обмоточные данные. В работе проведена параметрическая оптимизация угловых размеров ПМ в магнитной сборке Хальбаха посредством конечно-элементного моделирования по критерию максимальной индукции в воздушном зазоре. Соискателем определены основные ограничения при использовании высокотемпературных сверхпроводниковых обмоток, выработаны рекомендации для проектирования

их с учетом конструкционных и электромагнитных ограничений для сверхпроводниковых материалов. Разработанные рекомендации по оптимальным размерами позволяют спроектировать двигатели с хорошими удельными показателями. Интерес промышленных предприятий к данной разработке подтверждает ее практическую ценность

Рекомендации по использованию результатов работы

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в проектных организациях, конструкторских бюро и на промышленных предприятиях, занимающихся разработкой, проектированием и изготовлением аксиальных вентильных электрических машин. Основные теоретические выводы для данного класса электрических машин следует применить в учебном процессе вузов технических специальностей.

Апробация диссертации и публикации

Основные результаты диссертации были широко представлены научной общественности и обсуждались на Всероссийских и Международных конференциях. Исследования представлены в печати, включая публикации в изданиях аккредитованных ВАК и изданиях, входящих в международную наукометрическую базу Scopus.

Автореферат отражает основное содержание диссертации и соответствуют требованиям, предъявляемым ВАК Министерства науки и высшего образования РФ. При использовании в тексте результатов других авторов сделаны соответствующие ссылки. Работа оформлена в соответствии с существующими требованиями.

Вопросы и замечания по работе

При общей положительной оценке к работе имеются следующие вопросы и замечания:

Замечания по диссертационной работе;

1. Терминология в науке имеет важное значение. Применение термина «безжелезный якорь» следует считать неудачным. Он указывает на отсутствие магнитопроводящего материала, но не показывает какой материал в якоре присутствует. Более правильным и общепринятым является термин «диамагнитный якорь». Те же замечания можно отнести к термину «дисковая» электрическая машина. Более корректным был бы термин электрическая машина с аксиальным рабочим зазором, в отличие от традиционной машины с радиальным рабочим зазором.

2. В работе отмечены преимущества аксиальных машин, но не сделан акцент на их недостатках. Для этого типа машин затруднен отвод тепла из дискового якоря, что необходимо учитывать при выборе электромагнитных нагрузок. Затруднена сборка из-за наличия неподвижного дискового статора между двумя вращающимися дисковыми роторами. Особенно сложно собрать

многодисковую конструкцию, которая была указана в диссертации. Вопросам технологии для этого класса электрических машин в диссертации уделено недостаточно места.

3. В работе приводится оптимизация размеров магнитной системы при расположении магнитов по схеме Хальбаха. При этом в качестве варьируемого параметра выбран только угловой размер магнита. При этом высота магнита тоже влияет на получение максимального потока в рабочем зазоре. Если добавить в качестве варьируемого параметра второй размер, то результаты оптимальной геометрии могут измениться. Этого в работе сделано не было.

4. Выведенные в диссертации аналитические выражения (формулы 6-8) корректны и сомнения не вызывают, но, тем не менее, энергетику аксиальной машины определяет средний диаметр диска якоря и индуктора. Эти выражения были бы более наглядными и понятными, если привести их к среднему диаметру.

5. В анализируемой конструкции выбран не лучший вариант типа обмотки якоря, так как для этого типа обмотка имеет низкий коэффициент заполнения объема якоря медью. Более эффективные типы диамагнитных якорных обмоток рассмотрены не были.

6. В третьей главе для электромагнитного анализа дисковой вентильной машины задача была преобразована из трехмерной в двухмерную. Это значительно сократило время расчета и ресурсы вычислительной техники. Тем не менее из анализа выпали магнитные потоки рассеяния, характерные для трехмерной модели. Для корректности такого преобразования необходимо было по интегральным характеристикам (ЭДС вращения, результирующий момент, рабочий магнитный поток) оценить погрешность этого перехода. В диссертации заявлено, что существенного снижения точности по сравнению с трехмерной (3D) постановкой не произошло, но это надо было показать в цифрах.

7. Диссертация имела бы большую практическую значимость, если бы в ней на основе приведенных исследований была бы представлена инженерная методика проектирования аксиальных машин. Эту работу диссертант не провел.

8. Автореферат отражает основное содержание проведенной научной работы, но предоставленный диссертанту объем использован нерационально. Текст представлен через 1.5 интервала, хотя допускается 1.0 интервал. Имеется много свободного места при расположении рисунков. Объем допускается до 22-24 страниц. В автореферате часто не представлена информация, необходимая для более детального понимания полученных результатов, что заставляет обращаться к самой диссертации. При рациональном формате автореферата можно было бы работу представить более полно.

9. Работа изобилует большим количеством аббревиатур и сокращений. Это в значительной мере затрудняет восприятие сложного научного материала.

Указанные замечания хотя и отражаются на качестве изложения, однако не меняют общего положительного мнения о данной очень полезной инновационной научной работе.


Заключение

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

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Энергетического направления Политехнического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

подпись


Саяхов Ильдус

Ганджа Сергей Анатольевич

22.02.2023.

Докторская диссертация защищена
по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ауд.267,
кафедра «Электропривод, мехатроника и электромеханика»,
Телефон: +7 9120810902, +7 9088125819
Факс: +7 (351) 267-99-00
E_mail: gandzhasa@susu.ru



руководитель службы
производства
Цаулина

