

«УТВЕРЖДАЮ»  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»  
Проректор по научной работе  
В.К. Драгунов



« 27 02 2023 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва) 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**

Аэрокосмическая промышленность – это область, которая требует значительного увеличения удельной мощности электрических машин (ЭМ). Сюда входят более электрические самолеты (БЭС), гибридная/электрическая силовая установка (ГСУ/ЭСУ), электрическое руление по взлетно-посадочной полосе, а также беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в том числе с вертикальным взлетом и посадкой. 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, 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.

В настоящее время 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.

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.

В конструкции безжелезной дисковой ЭМ благодаря отсутствию магнитопровода упрощается технология создания статора, устраняются потери в стали и снижается полная масса. 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.

### **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.

### **Апробация работы и публикации**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и российских научно-технических конференциях. 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.

### **Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации**

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

### **Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации**

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. на с. 45 приведены выражения для расчета крутящего момента, было бы более целесообразно привести диапазон типовых значений для соотношения внешнего и внутреннего диаметров дисковой ЭМ.

2. на с. 51, рисунок 2.4 приведено изображение поперечного сечения катушки, при этом нигде не приведено выражение для расчета  $W_{обм}$ .

3. на с. 52 приведено выражение (27), в котором фигурирует наибольший общий делитель числа полюсов и числа пазов статора. Было бы более информативно привести таблицу значений данного параметра для разного числа пазов и полюсов.

4. на с. 59 представлен принцип преобразования трехмерной геометрии дисковой ЭМ в двумерную геометрию. При этом не указано какой тип эквивалентной ЭМ получается в итоге.

5. на с. 66, 67 рисунки 3.8-3.12 являются не информативными.

6. на с. 78 приведены ограничения применения сверхпроводников в ЭМ, в частности: «токонесущая способность ВТСП-лент зависит от величины воздействующего на них внешнего магнитного поля». При этом далее не приводятся зависимости критического тока от индукции магнитного поля.

### **Заключение**

Диссертация Саяхова Ильдуса Финатовича на тему «Разработка безжелезных дисковых электрических машин с магнитной сборкой Хальбаха для летательных аппаратов» представляет собой законченный научный труд, обладающий научной новизной, теоретической и практической значимостью.

Работа удовлетворяет предъявляемым требованиям «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».

Отзыв подготовлен кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником, заведующим кафедрой Электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Румянцевым Михаилом Юрьевичем.

Отзыв обсужден на заседании кафедры Электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», протокол № 02/23 от 06 февраля 2023 г.

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

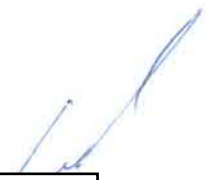


Телефон (495) 362-75-60, факс (495) 362-89-38

E-mail: [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru)

Сайт: <https://mpei.ru/>

Зав. кафедрой Электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта»  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

М.Ю. Румянцев

  
  
*Сегина* *Шоверинко*  
  
НАЧАЛЬНИК