

УТВЕРЖДАЮ

ВрИО генерального директора  
Акционерного общества  
«Электромашиностроительный  
завод «ЛЕПСЕ»



2024 г.

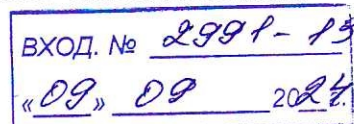
## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу  
**Барабанова Кирилла Андреевича на тему: «Разработка модульного  
безредукторного электропривода для воздушного винта электрического  
самолета», представленной на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности  
2.4.2 Электротехнические комплексы и системы**

### Актуальность работы

Авиационная промышленность продолжает активно развиваться с целью удовлетворения возрастающих требований к энергоэффективности, надежности и экологичности. В связи с этим значительно возрастает интерес к созданию электрических силовых установок, способных заменить традиционные двигатели внутреннего сгорания (ДВС), которые используются в авиации. Это обусловлено множеством недостатков ДВС, включая низкий коэффициент полезного действия, высокий уровень шума, сложное обслуживание, и значительный вес, что влияет на загрязнение окружающей среды и ограничивает функциональные возможности летательных аппаратов (ЛА). Переход к электроприводам является одним из путей решения данных проблем, что отражено в разработках более электрических самолетов (БЭС) и полностью электрических самолетов (ПЭС).

С другой стороны, реализация электроприводов в авиации сталкивается с определенными трудностями, такими как необходимость использования



редукторов для согласования частот вращения воздушных винтов и электродвигателей, что приводит к увеличению массы и снижению эффективности системы. В связи с этим в данной работе предложен подход к разработке модульной конструкции электропривода. Такая система обещает не только повысить эффективность использования пространства внутри ЛА, но и значительно улучшить экологические показатели, а также обеспечить высокую отказоустойчивость за счет возможности исключения из работы неисправных модулей. Это делает предложенный подход особенно перспективным для применения в современной легкой авиации, где важны как эффективность, так и экологическая безопасность полетов.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертация изложена на 156 страницах и включает в себя введение, 4 главы с выводами, заключение и список литературы из 101 наименований и 3 приложения.

Диссертация Барабанова Кирилла Андреевича изложена грамотным и научным языком, где каждый раздел имеет логическую причинно-следственную связь и законченные выводы.

Во введении обоснованы актуальность темы исследования, определены цели, сформулированы задачи и указаны методы их решения. Также представлена структура научной работы, подробно описывающая его компоновку и логику изложения материала.

В первой главе диссертации представлен аналитический обзор летательных аппаратов (ЛА), разработанных как отечественными, так и зарубежными производителями. В ней подробно анализируются силовые установки, работающие на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которые используются в данных ЛА. В дополнение к ЛА на ДВС, в главе изучены инициативы различных компаний в области реализации концепций более электрического самолета (БЭС) и полностью электрического самолета (ПЭС), предусматривающих использование электропривода в качестве основной силовой установки. Особое внимание уделено методам повышения



отказоустойчивости электродвигателей (ЭД), применяемых в электроприводах, а также рассмотрены технологические подходы к интеграции нескольких ЭД для увеличения мощности электропривода. На основании проведенного обзора сформулированы выводы о значимости использования электропривода в качестве силовой установки для привода воздушного винта ЛА и о выявленных проблемах в обеспечении отказоустойчивости и достижении высокой мощности силовой установки.

Во второй главе изложена разработка модульной конструкции высокомоментного электромеханического привода и методика управления на основе регулирования момента каждого модуля по модифицированному гармоническому закону, использующему функцию косинуса в квадрате. В рамках главы представлена математическая модель, описывающая профили фазных токов и токов в DQ-координатах, требующих модуляции через систему управления для достижения нужной характеристики момента. Также рассмотрен гармонический анализ фазных токов и выполнено проектирование электродвигателей для интеграции в модульный электропривод, включая анализ дополнительных потерь, вызванных гармоническими искажениями. Проведено сравнение массы, размеров и удельной мощности модульной конструкции с аналогичными характеристиками традиционных электродвигателей.

Третья глава посвящена созданию виртуально-имитационной компьютерной модели на основе уравнений для синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), что позволяет проверить возможность реализации предложенной методики управления. В главе использован векторный алгоритм управления для анализа работы модульного электропривода под различными нагрузками в виртуальной среде.

В четвертой главе представлены конструкция и сборка макетного образца модульного электропривода. Обсуждаются проблемы, возникшие при реализации модельной конструкции, и предложены пути их решения. Описана система управления и реализация нового способа управления. Представлены

результаты испытаний макета при различных нагрузках, сравниваются данные с использованием стандартного метода управления и новой методики.

Заключительная часть содержит основные выводы и результаты, изложенные в каждой из глав, а также формулирует направления для дальнейших исследований в рамках данной тематики.

**Научная новизна** данной работы выражается в следующих аспектах:

Разработана уникальная конструкция модульного безредукторного высокомоментного электропривода, которая позволяет уменьшить внешний диаметр по сравнению с традиционными тихоходными электроприводами. Достижение меньших размеров стало возможным благодаря увеличению числа модулей и общей длины привода. Привод обладает способностью генерировать высокий крутящий момент при сравнительно низкой частоте вращения, исключая необходимость применения механического редуктора.

Впервые предложен метод управления для модульного безредукторного электропривода, который базируется на гармоническом изменении момента каждого из модулей, сохраняя при этом постоянный общий момент на валу.

Разработана математическая модель, описывающая профили фазных токов, которые модулируются согласно модифицированному гармоническому закону, основанному на функции квадрата косинуса. Модель позволяет точно прогнозировать поведение электропривода при различных условиях работы.

Создана имитационная модель, способная анализировать рабочие режимы и характеристики модульного электропривода в контексте вентиляторной нагрузки. Эта модель обеспечивает возможность изучения и оптимизации параметров электропривода перед его фактической реализацией и тестированием.

**Теоретическая и практическая значимость** диссертационной работы проявляется в следующих аспектах:

Разработка конструкции модульного электропривода, предназначенного для привода воздушного винта, исключая необходимость использования редуктора и обладающая уменьшенным внешним диаметром.



Освоение методики управления, обеспечивающей функционирование разработанной конструкции модульного электропривода.

Создание компьютерной имитационной модели для модульного электропривода, позволяющей проводить исследования его поведения в разнообразных режимах и условиях эксплуатации.

Реализация макетного образца модульного электропривода вместе с программным обеспечением, которое исполняет разработанную методику управления, демонстрируя её практическую применимость.

Практическая ценность исследования подтверждается внедрением его результатов в учебный процесс экспериментально-инновационной школы «Моторы будущего» при УУНиТ, а также в производственные процессы компании ООО «ЭТК», что документально оформлено в приложениях Б и В соответственно.

**Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** данной работы обеспечиваются применением математических методов, методов компьютерного моделирования и экспериментальной проверкой на макетном образце.

#### **Апробация работы и публикации**

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием точных математических методов и компьютерного моделирования, что находит своё дополнительное подтверждение в результатах экспериментальных исследований. Результаты исследования были обсуждены в ходе следующих конференций: научно-практическая конференция «Электротехнические комплексы и системы» в Уфе в 2020–2021 годах, научно-техническая конференция «Пром–Инжиниринг» в Сочи в 2020 году и 15-я международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» в Омске в 2021 году.

Основные положения диссертации были опубликованы в 15 печатных изданиях, из которых семь индексируются в базе данных Scopus. Две работы

включены в перечень журналов, рекомендованных ВАК, и был получен один патент на изобретение.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты проведенного диссертантом исследования можно рекомендовать к внедрению в образовательных организациях, обучающих специалистов в области электромеханики и силовой электроники, а также в промышленных предприятиях, деятельность которых связана с разработкой и изготовлением электроприводов и систем управления.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Во введении в тему диссертационной работы говорится о летательных аппаратах легкой авиации. Автор диссертации не уточняет сферу применения летательных аппаратов в зависимости от целей полетов (военные, специального назначения, коммерческие, гражданские), а также способ управления летательным аппаратом (пилотируемый или беспилотный), что позволило бы определить наиболее важные критерии, необходимые управляющим устройствам летательного аппарата определенной сферы применения. В связи с этим не выделены четкие недостатки имеющихся конструкций электроприводов для летательных аппаратов, а в диссертации не сформулированы четкие задачи для преодоления существующих недостатков или улучшения существующих параметров, соответственно, в заключении нет числовых показателей, подтверждающих преимущества разрабатываемого электропривода над имеющимися.

2. Во введении автор выносит на защиту результаты исследования электромагнитных процессов и результаты экспериментального исследования макетного образца. Однако результаты исследования являются практической реализацией положений научной новизны. Результаты исследований не могут



являться положениями, выносимыми на защиту, и должны быть перенесены в раздел теоретической и практической значимости работы;

3. В главе описан синхронный двигатель с постоянными магнитами с определенными параметрами, однако не обоснованы тип обмотки и марка материала магнитов.

4. В главе 2 п. 2.6 рассмотрено влияние пульсаций синхронного двигателя с постоянными магнитами и связанные с ними отказы. Однако не учтено влияние критической скорости вращения ротора и резонанса, как источника дополнительных вибраций и предпосылкой к отказу. Также не раскрыта тема вероятных отказов, что является целью работы: «...анализ работы электропривода при возникновении отказов».

5. В третьей главе, посвященной имитационному моделированию, представлены графики фазных напряжений модулей модульного электропривода. Однако эти графики не сопровождаются поясняющими комментариями, что затрудняет их интерпретацию. В частности, на графиках можно заметить увеличение амплитуды фазного напряжения, что влечет за собой необходимость увеличения запаса по напряжению инвертора.

6. В рассматриваемом модульном электроприводе, в разделе имитационного моделирования, представлены графики электромагнитных моментов и фазных токов. Автор демонстрирует, что действующее значение фазных токов остается неизменным, однако наблюдается увеличение амплитуды фазного тока при использовании предложенного способа управления. В работе отсутствует анализ того, как это увеличение амплитуды фазного тока влияет на потери в инверторе при использовании предложенного способа управления.

7. В четвертой главе проведен механический анализ вала модульного электропривода на скручивание и оценка деформации конструкции. Однако в работе отсутствует расчет критической скорости вращения, которая приводит к дополнительным деформациям и напряжениям вала.

8. В диссертации отсутствует тепловой расчет электродвигателей, что является крайне важным показателем надежности электропривода. Отсутствует исследование охлаждения электродвигателей. При перегреве электродвигателя и одновременном падении напряжения на аккумуляторах блок управления не способен удерживать необходимую тягу на винтах. Также при перегреве электродвигателя может произойти тепловой пробой изоляции и отказ. Данные исследования отсутствуют в работе, что снижает степень разработанности темы.

9. В диссертации отсутствует расчет надежности для разработанного электропривода и сравнение показателей надежности с аналогичным электроприводом на базе двигателя внутреннего сгорания (отсутствуют числовые показатели, доказывающие повышение надежности разрабатываемого электропривода).

10. В главе 4, страница 115, рисунок 89, автору стоило бы привести позиционные обозначения составных частей модульного электропривода.

Указанные замечания не снижают общую ценность диссертационного исследования и не влияют на положительную оценку

### **Заключение**

Диссертация Барабанова Кирилла Андреевича на соискание ученой степени кандидата технических наук является законченной научно-квалификационной работой. В работе изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки в области электропривода, представляющие теоретическую и практическую значимость для науки и техники.

Диссертационная работа «Разработка модульного безредукторного электропривода для воздушного винта электрического самолета» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук согласно п.9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842), а ее автор Барабанов



Кирилл Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Отзыв обсужден на заседании структурного подразделения опытно-конструкторского бюро Акционерного общества «Электромашиностроительный завод «ЛЕПСЕ» от «21» 08.2024 г. протокол №21/190-2024.

Председатель заседания:

Кандидат технических наук,

Иштуинов Вячеслав Владимирович

Заместитель главного конструктора ОКБ

  
21.08.24 подпись, дата

Кандидатская диссертация защищена по специальности 05.09.01  
Электромеханика и электрические аппараты

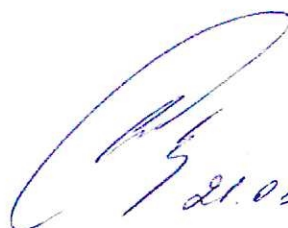
E-mail: IshuVV@lepse.kirov.ru

Тел.: (8332) 249-665

Кандидат технических наук,

Власов Андрей Иванович

Руководитель проекта

  
21.08.24 подпись, дата

Кандидатская диссертация защищена по специальности 05.09.01  
Электромеханика и электрические аппараты


E-mail: VlaAI@lepse.kirov.ru

Тел.: (8332) 249-665

Кандидат технических наук,

Русских Анна Николаевна

Ведущий инженер-конструктор ОКБ

  
21.08.24 подпись, дата

Кандидатская диссертация защищена по специальности 05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

E-mail: [IshuVV@lepse.kirov.ru](mailto:IshuVV@lepse.kirov.ru)

Тел.: (8332) 249-665

Адрес организации:

Акционерного общества «Электромашиностроительный завод «ЛЕПСЕ»,  
Россия, 610006, Кировская область, город Киров, Октябрьский проспект, 24

Тел: (8332)23-74-47

E-mail: [lepse@lepse.kirov.ru](mailto:lepse@lepse.kirov.ru)

Подписи Власова А.И., Иштутинова В.В. и Русских А.Н. заверяю

зам. технического директора  
по новой технике и НИОКР

21.08.2024 г. С.В. Гусевской