

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук,  
Кавалерова Бориса Владимировича на диссертационную работу Барабанова  
Кирилла Андреевича «Разработка модульного электропривода для  
воздушного винта электрического самолета», представленную на соискание  
ученой степени кандидата технических наук по научной специальности  
2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

### Актуальность темы диссертационного исследования

Для авиационной отрасли сегодня как никогда актуальны задачи улучшения энергоэффективности, повышения уровня электрификации, снижения массогабаритных показателей, оптимизации управления. Поэтому все с большей заинтересованностью и в нашей стране, и за рубежом рассматриваются и изучаются возможности современных концепций «более электрического самолета» и «полностью электрического самолета», в рамках которых требуется создавать новые электрические силовые установки, отвечающие жестким требованиям обеспечения безопасности полета и свободные от недостатков традиционных двигателей внутреннего сгорания. Здесь одним из активно развиваемых направлений, которое и исследует автор диссертации, является применение электропривода для малой авиации с воздушным винтом. В диссертации предложен и исследуется модульный безредукторный электропривод для воздушного винта самолета, данное направление исследований можно считать интересным и перспективным, нацеленным на дальнейшее повышение конкурентоспособности отечественной авиационной техники.

В настоящее время значительные усилия по разработке и внедрению силовых электроприводов в малой авиации сосредоточены на обеспечении надежности и безопасности полетов. Предлагаемые автором диссертации решения направлены на достижение именно этих целей. В диссертации исследуется модульный безредукторный электропривод на основе синхронной машины с постоянными магнитами, предложенная конструкция предполагает резервирование, а также улучшение отказоустойчивости и работы в аварийных режимах. Необходимо обратить внимание на комплексный подход в предпринятых исследованиях, К.А.Барабанов

ВХОД. № 2890-13  
«03» 09 2014г.

анализирует и исследует текущую проблемную ситуацию, заинтересованно изучает публикации по теме исследования, проводит патентный поиск, разрабатывает конструкцию электропривода, исследует ее с применением имитационного моделирования, разрабатывает способ управления модульным электроприводом, проводит анализ его работы при возникновении отказов, наконец, создает макетный образец и выполняет с ним серии экспериментов. В свою очередь по каждой из решаемых в диссертации задач также проводятся комплексные исследования. Так, оригинальный способ управления модульным электроприводом на основе изменения моментов по модифицированному гармоническому закону подробно исследуется и в теоретическом плане, и с применением компьютерного моделирования, и на макетном образце электропривода для того, чтобы показать его возможности в плане повышения эффективности и надежности электрических систем привода, достижения более плавного распределения нагрузки и уменьшения пульсаций момента, что важно для обеспечения стабильной работы воздушного винта. Таким образом, диссертационное исследование является вполне актуальным, оно будет полезно для дальнейшего развития малой авиации на электрической тяге, нацелено на улучшение эксплуатационных характеристик летательных аппаратов и открывает новые возможности по оптимизации их конструкции.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Диссертация имеет достаточно последовательную структуру, которая включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 101 наименования и приложения.

Во введении кратко обоснована актуальность темы, определяется цель и задачи исследования. Также здесь представлено сжатое содержание всей работы, видимо, это правильно – так читатель заранее может увидеть логику представления материалов диссертации.

Первая глава включает в себя достаточно подробный аналитический обзор существующих технологий в области приводов воздушного винта для легкой авиации. Чувствуется, что автор очень заинтересованно проводит исследования, он подробно изучает разные летательные аппараты, двигатели внутреннего сгорания и электродвигатели, как отечественные, так и зарубежные, классифицирует их, формирует таблицы, проводит сравнение, здесь же содержатся и выводы. Также нельзя не отметить хорошую работу с



научными публикациями других авторов, К.А.Барабанов не просто ссылается на них, но анализирует и критически оценивает предлагаемые в этих публикациях решения применительно к своей собственной теме исследований, анализируются и патенты, в которых отмечаются имеющиеся недостатки, все это позволяет говорить, что первая глава выполнена на достаточно хорошем квалификационном уровне. Хорошо сделаны и выводы по первой главе.

Во второй главе рассматривается математическое описание модульного электропривода. К.А.Барабанов вначале рассматривает разные варианты электропривода: многофазный, редукторный, тем самым обосновывая целесообразность своего собственного решения. Представлены исходные данные для проектирования и выполнено проектирование модуля электропривода. Для проверки того, как влияет диаметр электродвигателя на летные характеристики создана имитационная модель, учитывающая аэродинамические особенности летального аппарата. Получены значения возможного увеличения длительности и дальности полета при использовании предлагаемого модульного привода. Вообще, надо в положительном аспекте отметить, что автор диссертации очень активно использует моделирование в научных исследованиях, тем самым подтверждая принятые решения, компьютерное моделирование сопровождает, по сути, весь ход исследования, и в этой, и в последующих главах появляются новые имитационные модели. Также здесь представлена конструкция разрабатываемого трехмодульного электропривода, объясняется его принцип функционирования. Выбирается и обосновывается способ управления. Изложение сопровождается математическим описанием. Необходимо отметить предложенные автором, и важные в теоретическом плане, модифицированные координатные преобразования, удобные для математического описания разработанного метода управления. Для выполнения гармонического анализа автор разработал собственное программное обеспечение. Представлено проектирование макетного образца модуля электропривода. Большое внимание уделено анализу влияния пульсаций момента на работу электроприводов и методам их снижения.

Третья глава посвящена имитационному моделированию. Автор использовал методически оправданный подход последовательного усложнения моделей. На моделях исследуется предложенный способ

управления, и подтверждается его работоспособность. Представлено описание созданных моделей и алгоритмов управления.

Четвертая глава включает описание разработки макетного образца и результатов его экспериментальной проверки. Выполнен механический анализ конструкции вала модульного электропривода, представлено описание системы управления модульным приводом, особенности реализации алгоритма управления, результаты верификации.

Заключение подводит итоги проведенного исследования и перечисляет основные полученные результаты.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе**

Выводы и рекомендации, полученные при разработке конструкции модульного безредукторного электропривода, в достаточной степени теоретически обоснованы и подтверждены практическими эмпирическими данными модельных и натурных испытаний. Как было отмечено выше, все основные этапы исследования сопровождаются и подтверждаются компьютерным моделированием с использованием программных продуктов *Matlab Simulink* и *ANSYS MotorCad*, вслед за этим уже результаты модельных экспериментов сравниваются с испытаниями макетного образца модульного электропривода, для подтверждения предложенного оригинального способа управления.

### **Апробация работы и публикации**

По теме диссертационного исследования опубликовано 15 работ, среди которых 2 в изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, 7 статей в изданиях, включенных в базы данных Scopus, 5 статей в других изданиях. Получен 1 патент на изобретение.

### **Научная новизна** темы диссертационного исследования:

Впервые предложен метод управления электроприводом воздушного винта, основанный на изменении момента каждого из трех модуля по гармоническому закону при поддержании постоянного суммарного момента на валу.

Разработана математическая модель, описывающая фазные токи и их гармонические составляющие при использовании предложенного метода



управления. Модель предоставляет возможности для анализа и оптимизации работы модульного электропривода.

Создан целый ряд имитационных моделей для исследования поведения модульного электропривода, эти модели позволяют подробно изучать его характеристики и поведение при действии различных нагрузок. Моделирование подтверждает работоспособность и эффективность принятых решений.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов работы:**

Теоретическая значимость результатов исследования по разработке новой модульной конструкции заключается в расширении знаний о способах применения модульных принципов в электроприводах воздушных винтов летательных аппаратов. Это способствует углублению теоретических основ проектирования высокоэффективных и надежных электроприводов для авиации и других отраслей промышленности.

Введение метода управления, основанного на гармоническом изменении момента каждого модуля, представляет собой нестандартный подход в системах управления электроприводами. Этот метод открывает новые возможности для оптимизации работы электроприводов, улучшения их динамических характеристик и снижения пульсаций момента.

Самостоятельное значение имеют предложенные автором модифицированные координатные преобразования, необходимые для математического описания разработанного метода управления.

Практическая значимость работы, подтвержденная разработкой и экспериментальной верификацией макетного образца модульного электропривода, заключается в новых возможностях, которые предоставляет разработанный модульный безредукторный электропривод для развития малой авиации в рамках современной концепции электрического самолета.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В разделе 2.5 рассматривается проектирование макетного образца, представлены исходные данные и результаты расчета, но сам процесс проектирования отражен очень кратко, не показаны основные этапы проектирования с использованием применяемых программных средств.

2. В таблице 21, где сравниваются электрические двигатели, целесообразно было также указать удельную мощность.

3. Почему на рисунке 69 в имитационной модели для каждого модуля используется по две модели синхронного двигателя, одна стандартная, другая – созданная самостоятельно? Не объясняется их наличие и взаимодействие в рамках единой имитационной модели. Не хватает пояснений: как работает эта имитационная модель?

4. Представлены отклонения результатов имитационного моделирования от результатов проектирования, но не обсуждаются возможные причины этих отклонений.

5. Автор проводит механический анализ конструкции вала модульного привода, но не поясняет, решены ли проблемы теплоотведения и охлаждения при высоких нагрузках?

6. Непонятно, оценивалась ли надежность материалов и компонентов привода в условиях повышенных вибраций?

7. Рисункам 14, 29, 40, 89, 90 не хватает позиционных обозначений для описания составных частей и дополнительных комментариев, сопровождающих рисунки, без этого трудно понять конструкцию: что здесь является якорем, а что индуктором? Опечатки усугубляют дело: так, на стр. 115 сказано, что роторы стыкуются между собой образуя единый корпус, на стр. 117 говорится о вращении роторов и установке статоров на вал. Не поясняется в тексте четвертой главы как реализуется обращенная конструкция синхронной машины, каким образом выполнено электропитание вращающихся обмоток?

Вышеупомянутые недостатки не являются принципиальными и не снижают научной и практической значимости, а также общей положительной оценки диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация Барабанова Кирилла Андреевича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, и обладающей научной новизной и практической значимостью. В ней изложены новые научно-обоснованные технические решения и представлены практические результаты по исследованию модульных электроприводов, имеющие существенное значение для развития промышленности.



Диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук согласно п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842), а ее автор Барабанов Кирилл Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент

Д.т.н., доцент,

Заведующий кафедрой

«Электротехника и

электромеханика»


ФГАОУ ВО «Пермский

национальный

исследовательский

политехнический университет»

Кавалеров Борис Владимирович



27.08.2024

Даю согласие на обработку персональных данных.

614990, г. Пермь, главный корпус ПНИПУ, Комсомольский пр., 29,

к. 352,

Тел.: +7 (342) 219-86-61,

E-mail: kbv@pstu.ru

Докторская диссертация защищена по специальности 05.13.06 (2.3.3)

«Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)»

Подпись Кавалерова Б.В. заверяю:



Уполномоченный секретарь  
Ученого совета ПНИПУ

В.И. Макаревич

08 2024г.