

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Казакова Юрия Борисовича
на диссертационную работу Барабанова Кирилла Андреевича
«Разработка модульного безредукторного электропривода
для воздушного винта электрического самолета»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

На отзыв представлены:

- диссертация, изложенная на 156 страницах (149 страницы основного текста, 26 таблиц, 107 рисунков) и состоящая из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 101 наименования, приложений;
- автореферат диссертации.

Актуальность темы диссертационного исследования

Авиационная техника развивается в направлениях повышения надежности летательных аппаратов, их энергоэффективности, сокращения выбросов загрязняющих веществ. Системы привода воздушного винта самолетов на основе двигателей внутреннего сгорания имеют низкий коэффициент полезного действия, значительные выбросы вредных веществ и высокий уровень шума. Актуальны разработки электрических силовых установок и электроприводов для легких летательных аппаратов, их комплексное интегрирование, что позволяет повысить эффективность управления, снизить уровень шума и углеродный след при эксплуатации. Для привода воздушного винта самолета перспективным являются модульные безредукторные электроприводы, обеспечивающие повышенный вращающий момент на валу при низкой частоте вращения, с высокой надежностью и отказоустойчивостью при эксплуатации, позволяя продолжать работу привода при выходе из строя одного из модулей.

В связи с этим, тема диссертационной работы, посвященная разработке и исследованию модульного электропривода для воздушного винта электрического самолета, является актуальной и представляет значимый интерес для специалистов, работающих в области авиационной электромеханики и электропривода.

ВХОД. № 2708-13
«24» 08 2014 г.

Поставленные цель и задачи диссертации по разработке модульного электропривода воздушного винта электрического самолета, его математических и имитационных моделей для исследования электромагнитных процессов и режимов работы электропривода с учетом высших гармоник фазных токов, способа управления модульным приводом на основе изменения моментов модулей по модифицированному гармоническому закону, анализу работоспособности при возникновении отказов модулей, созданию макетного образца модульного электропривода, его экспериментальных исследований, верификации моделей и способа управления **соответствуют** направлениям исследований специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Для достижения цели и решения задач диссертации автором использованы основные методы математического анализа устройств электромеханики и электропривода, численные методы компьютерного моделирования физических полей и имитационного моделирования процессов, реализованные в распространенных программных комплексах *Ansys Motor-CAD* и *MATLAB/Simulink*. Для верификации разработанных моделей использованы методы экспериментальных исследований макетного образца модульного электропривода.

Оценка структуры и содержания диссертации. Диссертация написана ясно, использованная терминология и стиль соответствуют общепринятым нормам. Структура диссертации традиционная, имеет внутреннее единство, по каждой главе и диссертации в целом сделаны выводы, которые отражают результаты работы.

Во введении подчеркнута актуальность работы, обоснован выбор объекта и предмета исследования, приведены преимущества модульных безредукторных электроприводов, сформулированы цели и задачи диссертации, отражена научная новизна и практическая значимость исследований, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору приводов воздушного винта для легкой авиации. Обобщены требования, предъявляемые к приводам для достижения высокой эффективности, надежности, простоты обслуживания и масштабируемости. Сделан анализ типов используемых двигателей, включая двигатели внутреннего сгорания и современные электроприводы. Сделано заключение о перспективности разработок модульного электропривода.

Вторая глава включает разработку математической модели модульного

электропривода. Приведены основные уравнения, используемые для анализа электромагнитных процессов в электроприводе. Особое внимание уделено анализу влияния пульсаций момента электроприводов и методам их снижения, возможных отказов электропривода.

В третьей главе представлено имитационное моделирование режимов работы модульного электропривода и разработка системы его управления. Раскрыты особенности методов моделирования и управления, приведены описания результатов.

В четвертой главе приведено описание разработки конструкции, процесса сборки и результатов экспериментального исследования макетного образца модульного электропривода.

В заключении подведены итоги исследования, сформулированы основные выводы, намечены направления дальнейших исследований. Выводы логично вытекают из содержания работы.

Научная новизна:

1. Новый способ управления модульным безредукторным электроприводом, основанный на гармоническом изменении момента каждого модуля при постоянстве суммарного момента на валу, позволяющий обеспечить равномерную загрузку модулей, снизить пульсации момента, повысить эффективность и надежность работы привода.

2. Разработана математическая модель анализа электромагнитных процессов в модульном электроприводе, учитывающая изменения формы фазных токов с наличием высших гармоник при изменении момента по модифицированному закону в функции квадрата косинуса угла, зависящего от конструктивного поворота модулей.

3. Разработана имитационная модель модульного электропривода для анализа характеристик и режимов работы привода с вентиляторной нагрузкой на валу.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость результатов диссертации заключается в формировании нового подхода к разработке электроприводов повышенной надежности и эффективности за счет модульности. Разработанные математические модели электромагнитных процессов и имитационные модели режимов позволяют проводить анализ работы модульного электропривода.

Предложенный метод управления, основанный на гармоническом изменении момента каждого модуля при постоянном суммарном моменте на валу, обеспечивает повышенную точность управления моментом и минимизацию пульсаций момента.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в разработке конструкции модульного безредукторного электропривода повышенной удельной мощности для воздушного винта электрического самолета, обеспечивающей уменьшение внешнего диаметра привода, достижение повышенного момента на валу при низкой частоте вращения без использования редуктора, что позволяет повысить эффективность летательного аппарата за счет снижения лобового сопротивления. Применение модульности конструкции на практике повышает отказоустойчивость и надежность электропривода в целом при возникновении отказа одного из модулей. Разработка и экспериментальная верификация макетного образца модульного электропривода подтверждают его практическую применимость.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам направлений исследования паспорта научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления.

п.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов диссертации обусловлена корректным использованием современных математических методов анализа электромеханического

преобразования энергии, компьютерным моделированием модульного электропривода в распространенных программных комплексах, подтверждается сравнительным анализом аналитических решений с результатами численного моделирования, удовлетворительным совпадением расчетных результатов с результатами экспериментальных исследований.

Результаты диссертации в достаточной степени отражены в 15 публикациях автора, из них: 2 статьи опубликованы в изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, либо в научных изданиях, индексируемых базой RSCI - журнал «Электротехника», англоязычные версии этих статей также опубликованы в издании, включенном в базу данных Scopus – журнал «Russian Electrical Engineering», 10 работ опубликованы в других изданиях, 1 патент на изобретение.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертации обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат в компактном виде отражает содержание и основные положения диссертации, содержит выводы и полученные результаты. По автореферату можно оценить значимость проведенных исследований.

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Нет сравнения эффективностей модульной конструкции, состоящей из нескольких электродвигателей с двойным числом лобовых частей обмоток, ухудшающих использование электродвигателей, с одним удлиненным электродвигателем, имеющим только две лобовые части обмотки.

2. Для корректного математического анализа модульного электропривода следовало сформировать общую систему аналитических уравнений (например, соотношений 10, 11) для каждого модульного электродвигателя и связать их одним уравнением моментов, хотя это и реализовано в имитационных моделях.

3. Матрица преобразования (с. 57), используемая для конвертации трехфазных переменных в стационарной системе в координаты dq , строго корректна только для линейных систем, без учета зубчатости, насыщения, вытеснения токов и других нелинейностей, проявляющихся в

электродвигателях.

4. Имитационные модели предполагают конкретные значения параметров электродвигателей. Существуют способы реализации взаимосвязанных, через уравнение момента на общем валу, полевых моделей нескольких электродвигателей с учетом нелинейности их параметров, что использовано не было.

5. Конструкция электропривода, состоящая из трех модулей, приводит к существенному усложнению системы - необходимо использовать 18 силовых полупроводниковых ключей, 9 таймеров для управления ключами и достаточным числом АЦП в микроконтроллере для обработки аналоговых сигналов от датчиков. Требуется реализация сложного алгоритма управления, который должен синхронизировать работу трех двигателей. Это представляет не простую задачу аппаратной реализации и программирования. Нет оценки влияния усложнения системы на ее надежность и отказоустойчивость.

6. Алгоритм определения коэффициентов амплитуд гармоник пульсаций электромагнитного момента и углов сдвига фаз гармоник усложнен. Для каждой машины коэффициенты k_1, k_2, k_5, k_6, k_7 должен задавать пользователь.

7. На заявленный способ управления модульным электроприводом и разработанное программное обеспечение нет зарегистрированных результатов интеллектуальной деятельности.

8. Встречаются стилистические и смысловые недочеты: пункт 1 научной новизны представляет собой не научную новизну, а практическую значимость; табл. 1, 3. «Дальность полета – 1,302 км»?; подписи под рис. 32-34 одинаковые; в библиографическом списке 101 работа, а в диссертации присутствуют ссылки на работы [122], [110], [127]; многократная расшифровка «синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ)»; (с. 63, рис. 35) частота 1 гармоники 50 Гц, но для разработки СДПМ было задано $f = 400$ Гц (табл. 14, с. 45); неоднократно (с. 82, 85 диссертации, с. 11 автореферата) используется ошибочное выражение «синхронного двигателя постоянного тока (СДПМ)» вместо «... с постоянными магнитами»; (с. 95) модель на основе системы уравнений для модуля СДПМ: ud – напряжение **генератора?** по продольной оси; uq – напряжение **генератора?** по поперечной оси; в автореферате диссертации в подписи к рис. 5 следует считать не «токи», а «моменты»; и др.

Приведенные замечания в целом не меняют общего положительного впечатления о представленной диссертационной работе.

Заключение

Диссертация Барабанова Кирилла Андреевича «Разработка модульного безредукторного электропривода для воздушного винта электрического самолета» является законченной научно-квалификационной работой, выполнена на актуальную тему, содержит решение важной научно-технической задачи в области авиационного электропривода, имеет теоретическую и практическую значимость. По объекту и направлениям исследований, полученным новым научным результатам диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы. Диссертация 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) (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации № 62 от 25.01.2024 г.), а ее автор Барабанов Кирилл Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Я, Казаков Юрий Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электромеханика»
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
энергетический университет
имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

 Казаков Юрий Борисович

Докторская диссертация защищена по специальности
05.09.01. Электромеханика и электрические аппараты

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. А.
Тел.: +7 (4932) 269-715
E-mail: dr.kazakov@mail.ru

Дата составления отзыва " 2 августа 2024 г.
Подпись д. т. н., профессора Казакова Ю. Б. заверяю
Проректор по научной работе ИГЭУ



Тюников Владимир Валентинович