

На правах рукописи



БАРАБАНОВ Кирилл Андреевич

**РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОГО БЕЗРЕДУКТОРНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВОЗДУШНОГО ВИНТА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО САМОЛЕТА**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2024

Работа выполнена в Уфимском университете науки и технологий (ФГБОУ ВО УУНиТ) на кафедре электромеханики.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Исмагилов Флюр Рашитович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кзаков Юрий Борисович
профессор кафедры «Электромеханика»
ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный энергетический
университет»

доктор технических наук, доцент
Кавалеров Борис Владимирович
заведующий кафедрой «Электротехника
и электромеханика» ФГБОУ ВО
«Пермский Национальный
Исследовательский Политехнический
Университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Магнитогорский
государственный технический
университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск

Защита диссертации состоится «27» сентября 2024 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.479.10 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», адрес сайта: <http://www.uust.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2024г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Ямалов И.И.

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Авиационная промышленность находится в непрерывном развитии и совершенствовании, чтобы удовлетворить растущие требования к надежности, энергоэффективности и снижению выбросов вредных веществ в окружающую атмосферу. Наблюдается значительный рост количества разработок направленных на интегрирование электрических силовых установок и значительной электрификации летательных аппаратов. В особенности увеличивается область применения электроприводов на борту летательного аппарата. Данная тенденция обусловлена развитием концепций более электрического самолета (БЭС) и полностью электрического самолета (ПЭС).

Одно из направлений, где возможна реализация концепции ПЭС - легкая авиация, в частности летательные аппараты (ЛА), где тяга создается воздушным винтом. Традиционные системы привода винтов реализованы на двигателях внутреннего сгорания (ДВС). Данный подход имеет ряд недостатков:

- ДВС имеют довольно низкий КПД. При этом удельная мощность может достигать 1-1,5 кВт/кг

- При работе ДВС происходит выброс выхлопных газов (двуокись углерода CO_2 , оксиды азота NO_x).

- ДВС создают значительный шум во время работы, что способствует шумовому загрязнению, особенно во время взлета и посадки.

- ДВС требуют регулярного технического обслуживания и проверок для обеспечения их надлежащего функционирования.

- ДВС, как правило, тяжелые и громоздкие, что отрицательно сказывается на полезном объеме пространства внутри летательного аппарата.

- ДВС требуют дополнительных систем, таких как топливные насосы, системы охлаждения и выхлопные системы, редукторы, трансмиссия которые усложняют общую силовую установку.

В связи с этим растет количество разработок направленных на применение электрических силовых установок и электропривода в качестве основного привода воздушного винта для летательных аппаратов.

Однако и у такого подхода есть ряд трудностей. Рабочий диапазон частот вращения воздушных винтов летательных аппаратов находится в пределах 3-5 тысяч оборотов в минуту. Для достижения высоких мощностей электродвигателей их проектируют на более высокое число оборотов, что ведет к применению редуктора, увеличению массы и снижению полезного пространства. Существуют так называемые тихоходные электродвигатели обеспечивающий высокий момент, однако для таких двигателей характерен большой внешний диаметр и значительная масса.

Кроме того, к электродвигателям применяемым в авиации предъявляются повышенные требования к надежности, эффективности и отказоустойчивости, так как их работоспособность обеспечивает безопасность полета.

В данной работе предложена модульная безредукторная конструкция электропривода с алгоритмом управления, которые совместно обеспечивают высокий момент на валу при низкой частоте вращения за счет увеличения числа модулей и увеличения продольного размера привода. Модульность привода способствует повышению его отказоустойчивости, поскольку при возникновении отказа можно исключить из работы неисправный модуль или продолжить работу в аварийном режиме с применением компенсирующих техник.

Объектом исследования является электропривод воздушного винта летательного аппарата легкой авиации на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами и системы управления

Предметом исследования является модульная конструкция электропривода и способ управления, которые совместно обеспечивают высокий крутящий момент при низкой частоте вращения. При возникновении отказа одного из модулей система может продолжать работу за счет исключения из работы неисправного модуля или за счет компенсирующих техник, что позволяет минимизировать негативное влияние отказов и повысить отказоустойчивость системы.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование модульного электропривода воздушного винта для электрического самолета. В частности, реализация способа управления модульным электроприводом и анализ работы электропривода при возникновении отказов.

Задачи, решаемые в диссертации.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. разработка конструкции модульного безредукторного высокомоментного электропривода на основе СДПМ и системы управления;
2. разработка способа управления модульным приводом, на основе изменения моментов модулей по модифицированному гармоническому закону, выраженному функцией квадрата косинуса. Разработка математической модели модульного электропривода для реализации управления;
3. исследование электромагнитных процессов, протекающих в электроприводе при воздействии фазного тока, имеющего гармонические составляющие;
4. разработка имитационной модели модульного электропривода для анализа работоспособности и получения его характеристик с учетом высших гармоник в форме фазных токов СДПМ, вызванных способом управления; с учетом вентиляторной нагрузки на валу;
5. разработка макетного образца модульного электропривода для экспериментальной верификации предложенной конструкции и способа управления. Программная реализация предложенного алгоритма и его

экспериментальное исследование на макетном образце. Анализ работы привода при исключении из работы неисправного модуля.

Научная новизна работы:

1. Предложена конструкция модульного безредукторного электропривода. Преимущество предложенной конструкции модульного привода заключается в уменьшении внешнего диаметра по сравнению с традиционными тихоходными электроприводами за счет увеличения числа модулей и суммарной длины привода. При этом привод способен выдавать высокий момент при относительно низкой частоте вращения без использования механического редуктора.

2. Впервые предложен способ управления модульным безредукторным электроприводом, основанном на гармоническом изменении момента каждого модуля, при постоянном суммарном моменте на валу.

3. Разработана математическая модель, описывающая формы фазных токов при изменении момента по модифицированному гармоническому закону, выраженному функцией квадрата косинуса.

4. Разработана имитационная модель позволяющая анализировать режимы работы и характеристики модульного электропривода с учетом вентиляторной нагрузки.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Конструкция модульного электропривода, реализующая привод воздушного винта без использования редуктора с уменьшенным внешним диаметром.

2. Способ управления позволяющий реализовать предложенную конструкцию модульного электропривода.

3. Компьютерная имитационная модель модульного электропривода, позволяющая исследовать поведение электропривода в различных режимах и условиях.

4. Макетный образец модульного электропривода и программное обеспечение (ПО), реализующее предложенный способ управления модульным электроприводом.

5. Практическая ценность полученных результатов работы подтверждается актом внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс ПИШ «Моторы будущего» ФГБОУ ВО УУНиТ и в производственный процесс ООО «ЭТК».

Положения, выносимые на защиту

1. Конструкция модульного безредукторного электропривода.

2. Способ управления модульным электроприводом на основе изменения момента каждого модуля по модифицированному гармоническому закону, выраженной функцией косинуса в квадрате при постоянстве суммарного момента.

3. Результаты исследования электромагнитных процессов в модульном электроприводе.

4. Способ обеспечения отказоустойчивости за счет модульной конструкции электропривода и снижение пульсаций электромагнитного момента, вызванных отказом, за счет предложенного способа управления.

5. Результаты экспериментального исследования макетного образца при предложенном способе управления.

Методы и средства исследования.

Для достижения цели и выполнения задач исследования были применены различные подходы, включая использование методов математического анализа, принципов теории электроприводов и численного моделирования с помощью специализированного ПО. Расчет ЭД входящего в состав модульного привода и оценка влияния высших гармонических составляющих фазных токов проводились с использованием ПО Ansys Motor-CAD. Для верификации численных компьютерных моделей были использованы методы виртуально-имитационного компьютерного моделирования с использованием ПО MATLAB/Simulink. Для проверки работоспособности был использован метод экспериментальной верификации.

Обоснованность и достоверность

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлена использованием математических методов, методов компьютерного моделирования, а также проведением экспериментальной верификации на опытном образце.

Внедрение результатов работы

Макетный образец, являющийся воплощением теоретических разработок и экспериментальных исследований, будет активно использоваться в учебном процессе на кафедре, что позволит студентам наглядно изучать и анализировать особенности конструкции и работы устройства, развивать практические навыки в реальных условиях эксплуатации. Применение макетного образца в образовательных целях не только углубит теоретические знания студентов, но и способствует развитию инженерного мышления, дает возможность для проведения лабораторных и курсовых работ, а также может стать основой для дальнейших научных исследований и разработок в данной области. Таким образом, созданный макетный образец становится ценным активом кафедры, способствующим повышению качества образовательного процесса и формированию практической компетентности будущих специалистов. В будущем планируется реализация опытного образца с использованием наработок, полученных в данной работе. Внедрение результатов работы подтверждается актами внедрения в учебный процесс ПИШ «Моторы будущего» ФГБОУ ВО УУНиТ и в производственный процесс ООО «ЭТК».

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием строгих математических методов, методов компьютерного моделирования, подтверждаемых результатами экспериментальных исследований.

Результаты исследования были представлены и активно обсуждены в рамках международных форумов, включая научно-практическую конференцию «Электротехнические комплексы и системы» (2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems - ICOECS) в Уфе (2020–2022 гг.), научно-техническую конференцию "Пром–Инжиниринг" (International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing - ICIEAM) в Сочи (2020 г.), а также на 15-й международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Technical Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics) в Омске (2021 г.). А также на международной научно-практической конференции Электротехнические комплексы и системы (г. Уфа, 2020 г.), международной научной конференции Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности (г. Казань, 2020 г.)

Публикации:

Основные результаты исследования и положения диссертационной работы опубликованы в 15 печатных изданиях. Среди них 2 статьи опубликованы в журналах из перечня ВАК, 7 публикаций индексируются в базе данных Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх основных глав, заключения и библиографического списка. Текст диссертации занимает 156 страниц и содержит 107 иллюстраций, 26 таблиц и 3 приложения. Библиографический список содержит 101 источник.

Содержание работы

Во введении описаны текущие проблемы и актуальность выбранной темы исследования. Изложены цели, задачи и методы решения поставленных задач. Также представлена новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассмотрены зарубежные и российские компании, которые занимаются разработкой, производством и коммерциализацией легких ЛА, среди них: Cessna Aircraft Company, Beechcraft, Piper Aircraft, Diamond Aircraft Industries, Tecnam Aircraft, Zenith, Elector, Seregin Aircraft, НПО «Аэроволга», ООО самолетостроительная компания «ЧАЙКА», ООО «Орион-Авиа», ООО «Серебряные крылья», Компания «АКМ-Авиа», ПАО Корпорация «Иркут». Также рассмотрены силовые установки, применяемые в данных ЛА.

Анализ рассмотренных силовых установок показывает, что максимальное значение удельной мощности для представленных поршневых двигателей внутреннего сгорания составляет 2,1 кВт/кг. В то же время удельная мощность для современных ЭД может составлять до 5-7 кВт/кг.

Проведен обзор решений, направленных на реализацию концепции полностью электрического самолета. Представлены силовые установки, используемые в качестве привода воздушного винта. Среди данных решений

для привода воздушного винта используются ЭД с максимальным значением удельной мощности 7,7 кВт/кг. Также можно наблюдать следующую динамику: в случае поршневых двигателей внутреннего сгорания, при увеличении общей мощности установки, удельная мощность снижается, в то время как у ЭД, при аналогичном росте мощности, удельная мощность увеличивается. Таким образом реализация привода воздушного винта высокой мощности более предпочтительна с использованием ЭД, нежели на двигателях внутреннего сгорания.

Приведен обзор решений, направленных на обеспечение отказоустойчивости. Основная концепция практически всех решений заключается в изоляции места отказа и обеспечении резервирования для чего в основном и применяются многофазные электродвигатели. Одним из методов резервирования – использование нескольких электродвигателей на одном валу. Данный подход обеспечивает увеличение выходной мощности и работоспособность в случае возникновения отказа. Исходя из анализа было выявлено что наиболее распространенным способом обеспечения отказоустойчивости – резервирование.

Исходя из обзора современных решений в последующей главе предложена структура модульного привода.

Во второй главе рассмотрено влияние внешнего диаметра электропривода на длительность и дальность полета ЛА. Для проведения данной оценки рассматривались два ЛА: Сигма-4 и *Diamond DA42 Twinstar*. При сравнении рассматривалось два подхода: использование одного электродвигателя и использование трех электродвигателей с сопоставимой суммарной мощностью. Результаты сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оценки внешнего диаметра электродвигателя на длительность и дальность полета ЛА

Параметр	Сигма 4 (Emrax 268)	Сигма 4 (Предлагаемый ЭД)	<i>Diamond DA42 Twinstar</i> (Emrax 268)	<i>Diamond DA42 Twinstar</i> (Предлагаемый ЭД)
Фронтальная площадь, м ²	3,111590	3,045739	4,554876	4,327932
Дальность полета, км	250	259	94	100
Длительность полета, мин	116	120,8	33	35

Для ЛА Сигма 4 подход с модульным электроприводом со сниженным значением внешнего диаметра позволяет снизить фронтальную площадь ЛА на 2,1%, по сравнению с электроприводом с одним ЭД. При этом дальность полета увеличивается на 3,6%, а продолжительность на 4,1%. Для ЛА *Diamond DA42 Twinstar* подход с модульным электроприводом со сниженным значением внешнего диаметра позволяет снизить фронтальную площадь ЛА на 5%, по сравнению с электроприводом с одним ЭД. При этом дальность полета увеличивается на 6,4%, а продолжительность на 6,06%.

Предложена модульная конструкция электропривода, представлена математическая модель способа управления модульным электроприводом. Принцип работы заключен в гармоническом изменении моментов модулей каждой машины. Для гармонического изменения момента необходимо чтобы ток поперечной составляющей I_q , также изменялся по гармоническому закону.

$$m = M \cos^2(z_p N \omega t + (i - 1)\varphi) \quad (1)$$

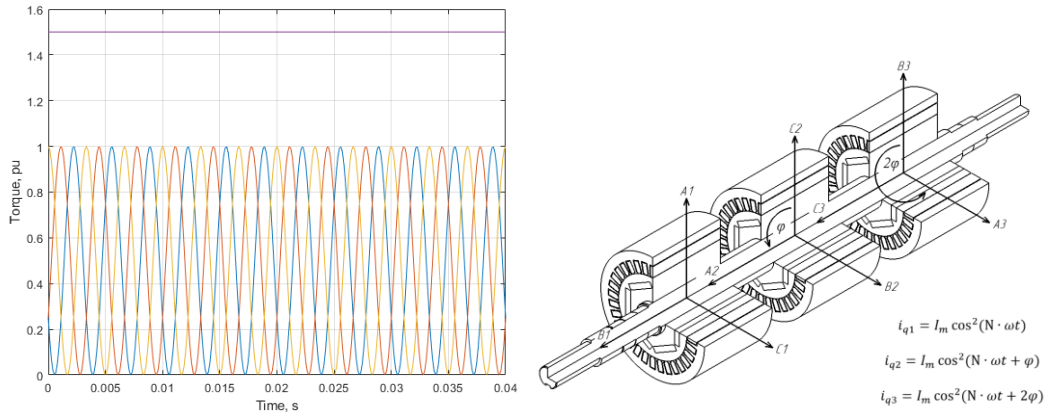


Рисунок 1 – Графики моментов во временной области и структурная схема электропривода

Были приведены выражения для перехода из трехфазной системы координат к вращающейся системе координат $dq0$ и далее приведение нестационарной поперечной составляющей тока I_q к стационарному виду. Также приведены выражения для проведения образного преобразования и вращающейся системы координат к трехфазной. В качестве модуля рассматривался СДПМ.

$$i_{ABC} = \begin{bmatrix} -I_q' \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos^2(N \cdot \omega t) \\ \frac{I_q' \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos^2(N \cdot \omega t)}{2} + \frac{\sqrt{3} \cdot I_q' \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos^2(N \cdot \omega t)}{2} \\ \frac{I_q' \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos^2(N \cdot \omega t)}{2} - \frac{\sqrt{3} \cdot I_q' \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos^2(N \cdot \omega t)}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$i'_{dq0} = \begin{bmatrix} \left(\frac{2 \cdot I_A}{3} - \frac{I_B}{3} - \frac{I_C}{3} \right) \cdot \cos(\omega t) + \left(\frac{\sqrt{3} \cdot I_B}{3} - \frac{\sqrt{3} \cdot I_C}{3} \right) \cdot \sin(\omega t) \\ - \frac{\left(\frac{2 \cdot I_A}{3} - \frac{I_B}{3} - \frac{I_C}{3} \right) \cdot \sin(\omega t)}{\cos^2(N \cdot \omega t)} + \frac{\left(\frac{\sqrt{3} \cdot I_B}{3} - \frac{\sqrt{3} \cdot I_C}{3} \right) \cdot \cos(\omega t)}{\cos^2(N \cdot \omega t)} \\ \frac{I_A}{3} + \frac{I_B}{3} + \frac{I_C}{3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

В ходе анализа было определено, что в спектре гармоник фазного тока в равной степени присутствуют 5 и 7 гармоники (рисунок 2). При проектировании СДПМ стараются минимизировать гармонические составляющие. Однако в данном случае гармонические составляющие обеспечивают изменение момента модуля. Наличие гармоник и модуляция фазного тока требует повышение частоты ШИМ для обеспечения требуемой формы тока, вследствие чего возрастут динамические потери в ключах инвертора.



Рисунок 2–Амплитудный спектр

Также в данной главе было проведено проектирование модуля СДПМ и проверка возможности модуляции момента по гармоническому закону. В ходе проектирования было выявлено что при питании обмоток фаз модуля СДПМ фазными токами, имеющим гармонические составляющие, потери в модуле выросли на 0,32%

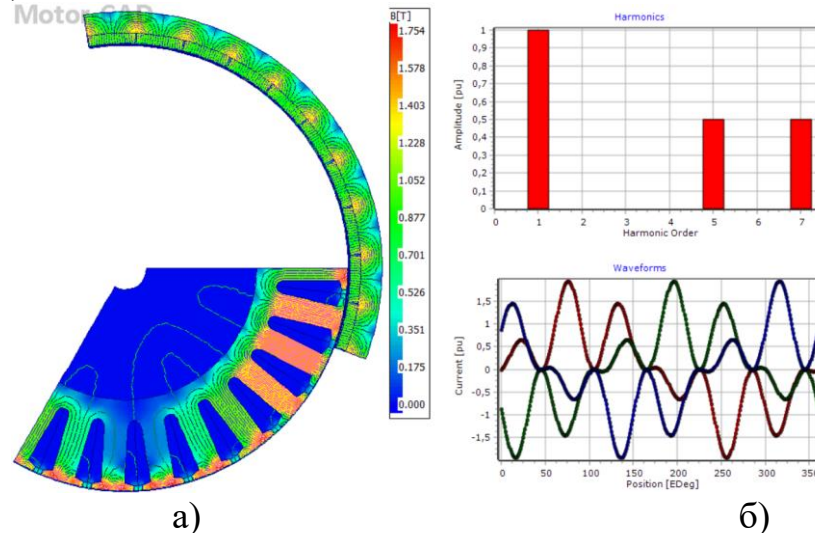


Рисунок 3 – Результаты проектирования модуля СДПМ а) распределение магнитной индукции б) форма фазных токов и гармонические составляющие

Основным интересом при проектировании СДПМ являлось сравнение параметров при двух различных типах управления: стандартного с постоянной величиной электромагнитного момента и предложенного способа с изменением электромагнитного момента по модифицированному гармоническому закону. Результаты проектирования представлены на рисунках 4, 5.

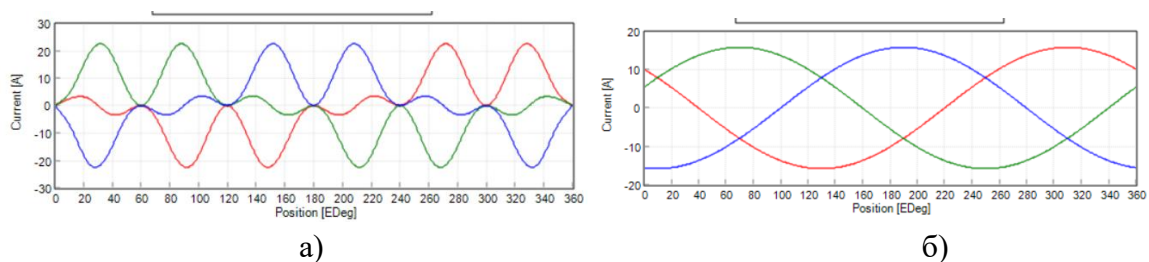
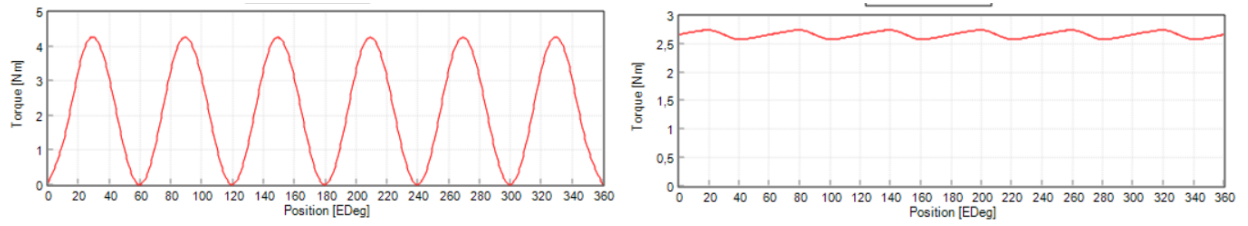


Рисунок 4 – Зависимости фазных токов обмоток от углового положения вала а) предложенный способ управления; б) стандартный способ управления



а)

б)

Рисунок 5 – Зависимости фазных токов обмоток стандартного СДПМ и модульного СДПМ от времени.

а) предложенный способ управления; б) стандартный способ управления

При первичном анализе возникла гипотеза о том, что гармоническое изменение момента может исключить пульсации момента синхронного двигателя постоянного тока (СДПМ). Для проверки этой гипотезы был разработан модуль СДПМ и проанализирован с использованием программного комплекса ANSYS Motor CAD. Моделирование проводилось для трех модулей, чьи моменты были смещены по фазе на 120 градусов. Графики электромагнитных моментов модулей и суммарного электромагнитного момента приведены на рисунке 6. Из анализа данных графиков следует, что модуляция момента не обеспечивает полного устранения пульсаций момента, связанных с особенностями геометрии СДПМ.

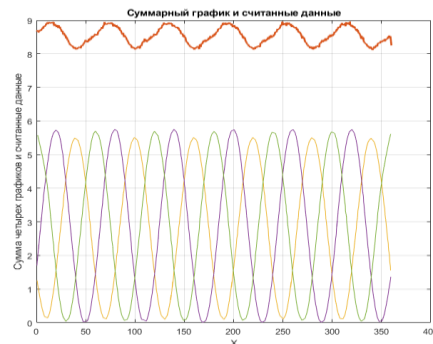


Рисунок 6- Электромагнитные моменты модулей и суммарный момент

Эти пульсации связаны с использованием прямоугольных магнитов без зазора между ними, что приводит к изменению индуктивностей в осях $dq0$ при повороте ротора в зависимости от угла поворота. В результате этого предположение о равенстве индуктивностей в осях $dq0$ становится некорректным. Кроме того, анализ показал, что пульсации момента, обусловленные геометрией синхронного двигателя постоянного тока, включают в себя 6-ю и 12-ю гармоники момента.

Однако существует возможность применения модифицированного гармонического закона с целью снижения уровня пульсаций. В рамках данной работы предлагается метод изменения электромагнитного момента в соответствии с модифицированным гармоническим законом путем модуляции тока по оси q , выраженным уравнением (4). Для успешного применения данного подхода к снижению пульсаций момента возможно использование формулы (5). Для использования данной формулы необходимо определить

коэффициент амплитуды 6-ой гармоники момента СДПМ k_6 и сдвиг фазы 6-ой гармоники момента γ .

$$i_q = I_m \cos^2(N\omega t + \varphi). \quad (4)$$

где I_m – амплитуда тока в оси q;

ω – частота вращения;

N – количество модулей;

φ – сдвиг фаз между модулями.

$$i_q = I_m + k_6 \cdot I_m \cdot \cos^2(N\omega t + \gamma). \quad (5)$$

где k_1 – коэффициент амплитуды 6 гармоники момента СДПМ;

γ – сдвиг фазы 6 гармоники момента.

На рисунке 7 представлен график электромагнитного момента модуля без компенсации пульсаций момента и график электромагнитного момента с компенсацией пульсаций.

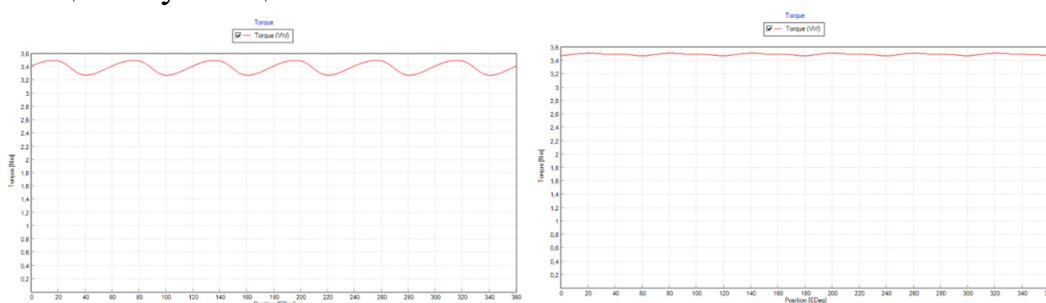


Рисунок 7 – График электромагнитного момента модуля СДПМ

Таблица 2 – Результаты моделирования СДПМ в Ansys Motor CAD

Параметр	Без компенсации пульсаций	С компенсацией пульсаций (6 гармоника)	С компенсацией пульсаций (6+12 гармоник)
Выходной момент, Нм	3,38	3,5	3,5
Пульсации момента, %	6,65	2,52	1,5688
Пульсации момента, Нм	0,211	0,0822	0,0511

Таким образом, при использовании компонента, основанного на модифицированном гармоническом законе, выраженном функцией квадрата косинуса, для компенсации пульсаций электромагнитного момента, вызванных особенностями геометрии синхронного двигателя постоянного тока (СДПМ), снижение уровня этих пульсаций на 67% при компенсации только 6-ой гармоники, на 76% при компенсации как 6-ой, так и 12-ой гармоник, а также увеличение величины электромагнитного момента на 3%.

Отдельным интересом является поведение СДПМ при возникновении отказа. На рисунке 8 представлена имитационная модель СДПМ на основе магнитной системы. Данная модель построена на основе СДПМ, содержащей 9 пазов, 10 полюсов и позволяет оценить фазные токи и электромагнитный момент в случае появления следующих отказов: обрыв фазы, замыкание обмотки на корпус, межвитковое замыкание, размагничивание магнитов.

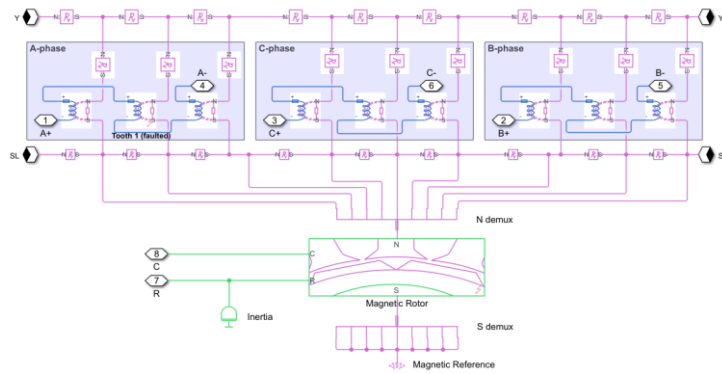


Рисунок 8 - Имитационная модель для анализа отказов в СДПМ

Можно отметить, что в СДПМ возникают пульсации момента, и данные пульсации в своем спектре имеют 2 гармонику момента для случаев обрыва фазы и размагничивания магнитов. Наличие подобной пульсации момента в одном из модулей внесет пульсацию в суммарный момент.

Для такого случая можно применить следующий подход: Управление неисправным модулем оставить неизменным, а в управление двумя другими модулями внести составляющие второй гармоники момента таким образом, чтобы суммарный момент привода оставался постоянным и тем самым компенсировать пульсации момента, вызванные отказом. Для создания компенсирующей пульсации в исправном модуле, имеющей 2 гармонику момента, выражение (5) в котором один из аргументов функции квадрата косинуса угол положения ротора, умноженный на количество модулей $N\omega t$ заменить на угол положения ротора. Таким образом для создания 2 гармоники момента, выражение примет вид:

$$i_q = I_m + k_2 \cdot I_m \cdot \cos^2(\omega t + \gamma). \quad (6)$$

Анализ выражения для создания пульсаций момента 2 гармоники (основная частота 50 Гц), рисунок 9, показывает, что фазные токи имеют в своем составе 3 гармонику тока.

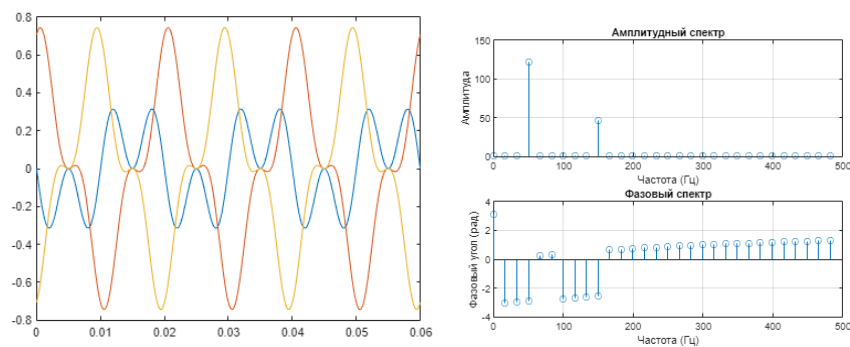


Рисунок 9 – Электромагнитный момент в о.е. полученный с помощью выражения (6)

Случаи отказа, связанные с замыканием на корпус и межвитковым замыканием являются более сложными так как в спектре гармоник электромагнитного момента возникают 1 и 2 гармоники. Для такого случая

выражение (6) можно модифицировать что бы получить компенсирующие пульсации в исправных модулях:

$$i_q = I_m + k_1 \cdot I_m \cdot \cos(\omega t + \gamma_1) + k_2 \cdot I_m \cdot \cos^2(\omega t + \gamma_2). \quad (7)$$

Таким образом предложенный в работе способ управления, основанный на изменении электромагнитного момента отдельного модуля по модифицированному гармоническому закону, выраженному функцией квадрата косинуса, можно модифицировать чтобы компенсировать пульсации момента обусловленные геометрией СДПМ. Появляется возможность снижать пульсации момента в случае возникновения отказов в СДПМ путем добавления компенсирующей пульсации в исправные модули модульного привода.

В третьей главе разработаны имитационные модели модульного привода на основе системы уравнений для СМППМ и имитационная модель модульного привода с системой управления на основе векторного алгоритма ШИМ.

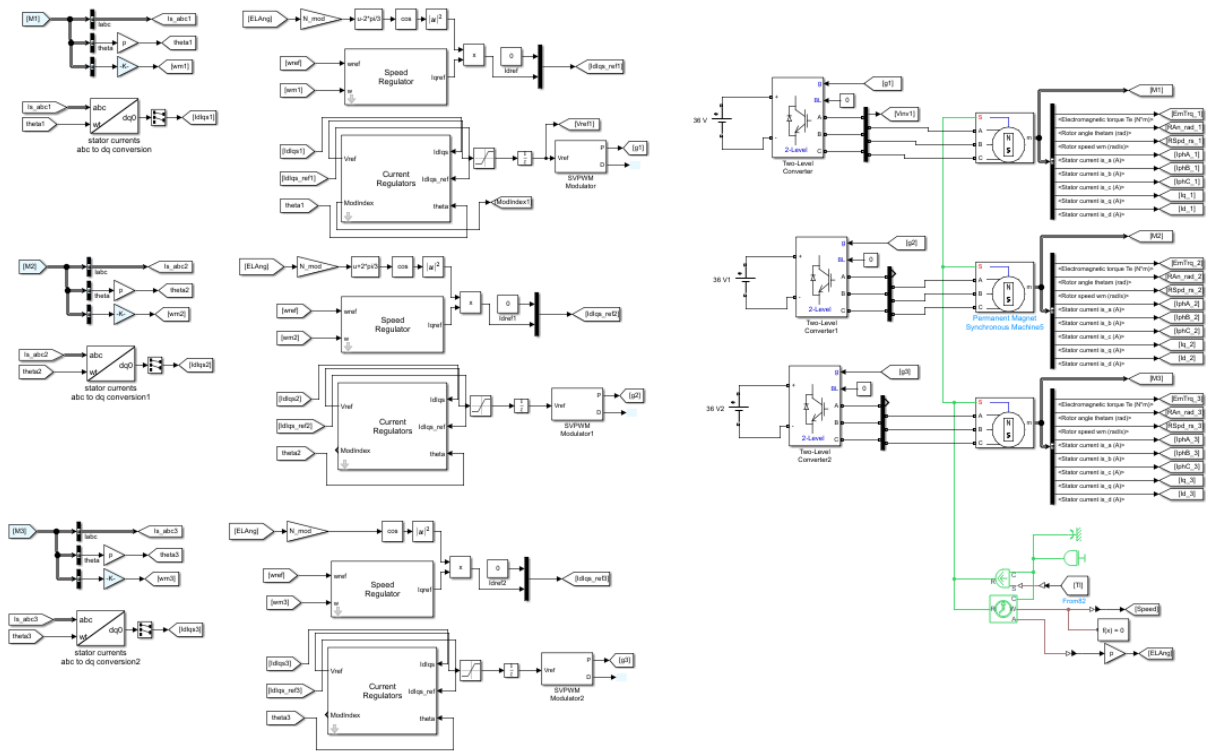


Рисунок 10 – Общий вид имитационной модели с применением векторного управления

Результаты моделирования подтверждают возможность реализации модульного привода по предложенному подходу изменения электромагнитных моментов модулей по модифицированному гармоническому закону, а также достижения итоговой величины момента нагрузки 10,15 Нм.

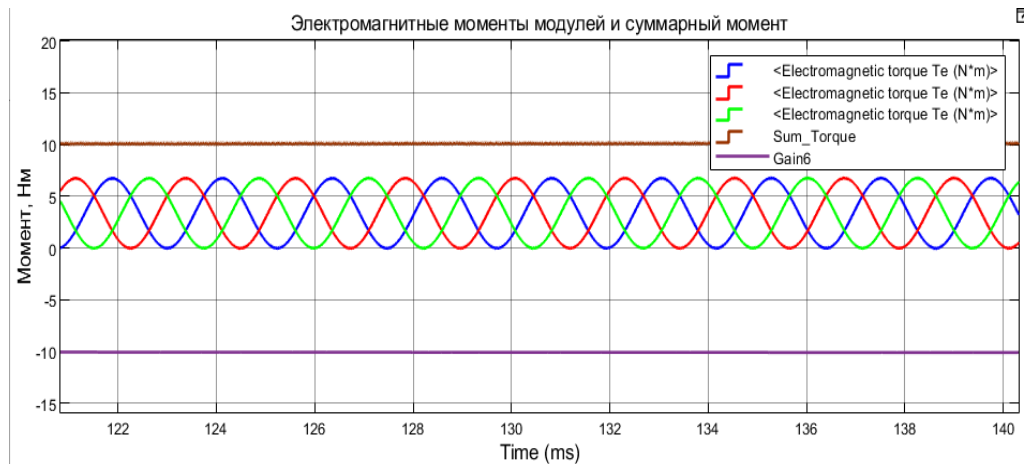
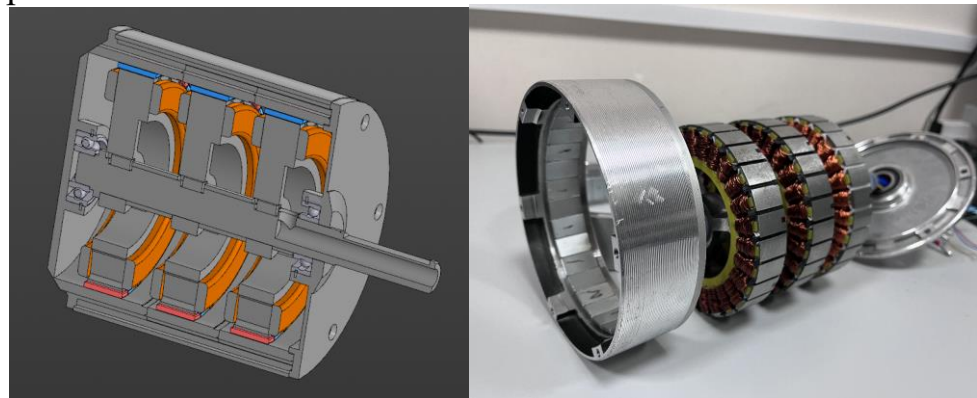


Рисунок 11– График моментов модулей, момента нагрузки и суммарного электромагнитного момента

В четвертой главе представлены описание конструкции привода и системы управления.



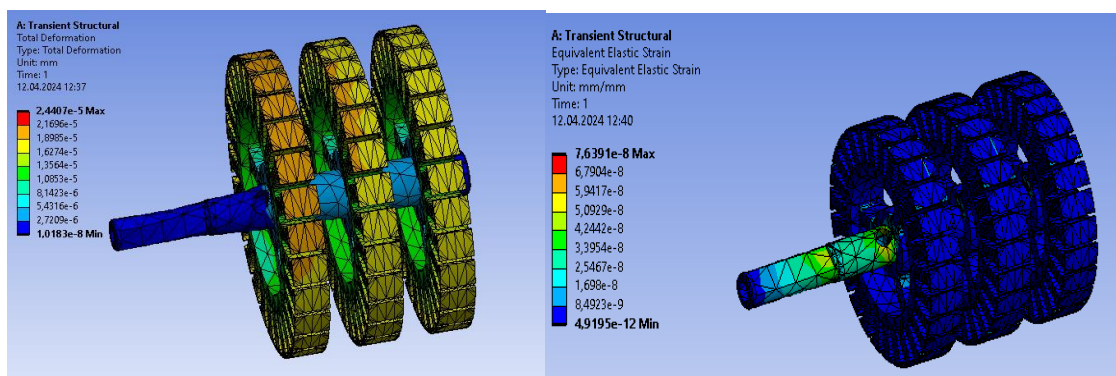
а)

б)

Рисунок 12 – Модульный электропривод а) 3Д модель б) составные части привода

При возникновении электромагнитного момента, создаваемого в процессе протекания тока в обмотках СДПМ, возникает реактивный момент, противоположный направлению вращения ротора воздействующий на статор, вал и соответственно на опорную конструкцию. В результате этого явления при предложенном способе управления, когда моменты модулей изменяются во времени, будет создаваться разность моментов между модулями, которая будет приводить к скручиванию вала.

Для проведения механического анализа конструкции вала на скручивание геометрия вала со статорами импортировалась в программный комплекс Ansys Workbench с использованием инструмента Transient Structural, который позволяет моделировать и анализировать динамические процессы в структурных системах, подверженных временным нагрузкам или изменяющимся во времени внешним воздействиям.



а) б)
Рисунок 13 – Результаты механического анализа

а) Оценка общей деформации структуры; б) Анализ эквивалентной упругой деформации

Проведен механический анализ деформаций и напряжений, которые могут возникнуть на валу модульного привода. Анализ общей деформации показывает максимальное смещение 24,4 микрометра в области статора и 2,72 микрометра в области вала между модулями. Анализ эквивалентной упругой деформации показывает максимальное смещение на участке вала между областью фиксации и статором первого модуля $7,64e-8$ мм. Анализ эквивалентного напряжения показывает, что на данном участке максимальное напряжение составляет 0,0144 Мпа. Таким образом в рассматриваемой конструкции вала не возникает сильных деформаций и напряжений, которые могут привести к повреждению конструкции.

Также проведен анализ усталости, который показывает, что рассматриваемая конструкция обладает достаточной прочностью и при предложенном способе управления с изменением электромагнитных моментов модулей по модифицированному гармоническому закону не приведет к снижению срока службы и появлению повреждений.

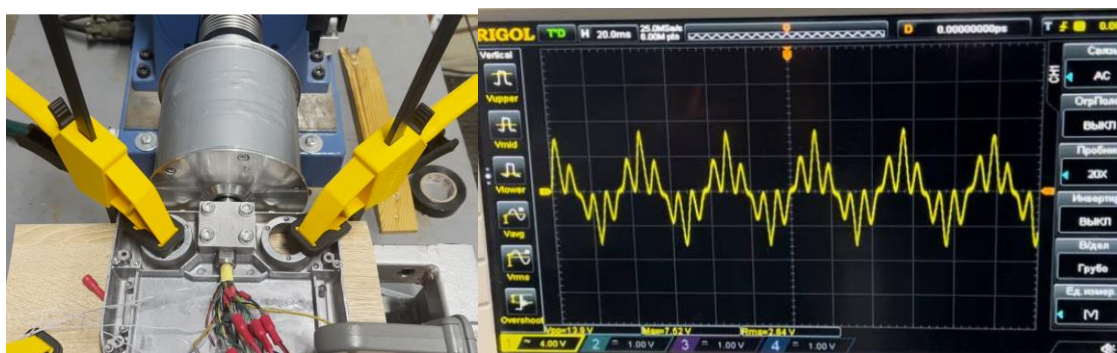


Рисунок 14 – Испытательная установка и осциллограмма фазного тока одного из модулей

Представлены результаты экспериментального исследования. Подтверждена возможность реализации предложенного способа управления путем модуляции фазных токов для достижения изменения момента по гармоническому закону. Испытания показали достижение момента в 9,7 Нм

при частоте вращения 300 об/мин, что подтверждает соответствие теоретическим расчетам с разницей в 4,43%.

В заключении проведено исследование модульного безредукторного привода для применения в легкой авиации в качестве привода воздушного винта. Приведены параметры ЛА, распространенных на рынке и характеристики их силовых установок. В ходе анализа работ посвященных реализации концепций БЭС и ПЭС было выявлено преимущество привода на основе ЭД в плане удельной мощности перед ДВС.

1. Разработана конструкция модульного безредукторного привода на основе СДПМ, способная обеспечить высокий момент за счет увеличения количества модулей. Проведена оценка влияния габаритов ЭД на фронтальную площадь ЛА и соответственно на дальность и длительность полета ЛА. При использовании подхода с модульным электроприводом для ЛА Сигма-4 дальность полета увеличивается на 3,6%, продолжительность на 4,1%, для ЛА *Diamond DA42 Twinstar* дальность полета увеличивается на 6,4%, а продолжительность на 6,06%.

2. Предложен оригинальный способ управления модульным приводом на основе изменения моментов модулей по модифицированному гармоническому закону, выраженному функцией квадрата косинуса. Этот метод позволяет изменять электромагнитный момент каждого модуля по гармоническому закону при сохранении постоянного значения суммарного момента привода. Анализ показал наличие высших гармоник (5 и 7 гармоники) в фазных токах СДПМ.

3. Проведено исследование электромагнитных процессов в электроприводе при воздействии фазного тока, содержащего гармонические составляющие. При питании обмоток фаз модуля СДПМ фазными токами, имеющими гармонические составляющие, возникает 6 гармоника электромагнитного момента.

4. Созданы имитационные модели модульного привода для анализа работоспособности и получения его характеристик с учетом высших гармоник фазных токов и вентиляторной нагрузки на валу. Результаты моделирования подтвердили способность привода достигать момента в 10 Нм при частоте вращения 300 об/мин.

5. Создан макетный образец модульного электропривода для экспериментальной проверки предложенной конструкции и способа управления. Испытания показали достижение момента в 9,7 Нм при частоте вращения 300 об/мин, что подтверждает соответствие теоретическим расчетам с разницей в 4,43%. Эксперименты также подтвердили отказоустойчивость привода: при отключении одного модуля максимальный момент составил 6,5 Нм, при отключении двух модулей – 3,2 Нм.

Таким образом, все поставленные задачи были успешно решены, что подтверждает эффективность предложенного подхода к разработке модульного безредукторного электропривода для легкой авиации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Барабанов, К.А. Разработка и моделирование модульного высокомоментного безредукторного электропривода для авиационного применения / К.А. Барабанов, Д.Р. Фаррахов, И.Х. Хайруллин, И.И. Уразбахтин // *Электротехника*. – 2022. – № 12. – С. 34-37.
2. Ямалов, И.И. Совместное проектирование авиационного синхронного генератора с постоянными магнитами и стабилизатором напряжения / И.И. Ямалов, К.А. Барабанов, И.А. Аюпов, Г.С. Зиннатуллина // *Электротехника*. – 2022. – № 12. – С. 14-18.

В изданиях, входящих в базу данных SCOPUS и Web of Science:

3. Ismagilov, F.R. The six-phase fault tolerant synchronous generator with permanent magnets for aircraft application / F.R. Ismagilov, V.E. Vavilov, R.D. Karimov, K.A. Barabanov // *Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 мая 2020 года*. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9112055. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112055.
4. Farrakhov, D.R. Quasi-resonant buck converter for high power application / D.R. Farrakhov, K.A. Barabanov, A.A. Podguzov [et al.] // *Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, Ufa, 27–30 октября 2020 года*. – Ufa, 2020. – P. 9278426. – DOI 10.1109/ICOECS50468.2020.9278426.
5. Farrakhov, D.R. Design features of a starter-generator control system / D.R. Farrakhov, I.I. Yamalov, K.A. Barabanov, A.A. Podguzov // *Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, Ufa, 27–30 октября 2020 года*. – Ufa, 2020. – P. 9278441. – DOI 10.1109/ICOECS50468.2020.9278441.
6. Farrakhov, D.R. Novel modular design of gearless electric drive for propeller of an all-electric aircraft / D.R. Farrakhov, K.A. Barabanov // *Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, Ufa, 27–30 октября 2020 года*. – Ufa, 2020. – P. 9278467. – DOI 10.1109/ICOECS50468.2020.9278467.
7. Barabanov, K.A. Development and Simulation of a Modular High-Torque Gearless Electric Drive for Aviation Purposes / K.A. Barabanov, D.R. Farrakhov, I.Kh. Khayrullin, I.I. Urazbakhtin // *Russian Electrical Engineering*. – 2022. – Vol. 93, No. 12. – P. 776-779.
8. Yamalov, I.I. A Joint Design of an Aviation Synchronous Generator with Permanent Magnets and a Voltage Stabilizer / I.I. Yamalov, K.A. Barabanov, I.A. Ayupov, G.S. Zinnatullina // *Russian Electrical Engineering*. – 2022. – Vol. 93, No. 12. – P. 753-757.
9. Ismagilov, F.R. Development of an AC / DC Converter for Powering a Load of 540 v DC / F.R. Ismagilov, V.E. Vavilov, D.V. Gusakov, K.A. Barabanov, I.R. Garipov // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics : 15th*

International IEEE Scientific and Technical Conference, Omsk, 09–11 ноября 2021 года. – IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. – DOI 10.1109/Dynamics52735.2021.9653717.

Публикации в других изданиях:

10. Эффективность применения в синхронных машинах с постоянными магнитами внешнего ротора / О. А. Юшкова, А. А. Меднов, К. А. Барабанов [и др.] // Электротехнические комплексы и системы: Международная научно-практическая конференция, Уфа, 27–30 октября 2020 года. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. – С. 176–181.

11. Исследование эффективности жидкостного охлаждения для электрических машин с внешним ротором методом компьютерного моделирования / Е. О. Жарков, А. М. Веселов, О. А. Юшкова [и др.] // Электротехнические комплексы и системы: Международная научно-практическая конференция, Уфа, 27–30 октября 2020 года. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. – С. 192–197.

12. К вопросу о неблагоприятных внешних воздействиях, имеющих место при функционировании авиационных электрических машин / Ф. Р. Исмагилов, И. И. Ямалов, Р. Р. Уразбахтин [и др.] // Электротехнические комплексы и системы: Международная научно-практическая конференция, Уфа, 27–30 октября 2020 года. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021. – С. 204–210.

13. Комплексная диагностика и мониторинг состояния современных электрических машин / Ф. Р. Исмагилов, Р. Р. Уразбахтин, И. И. Ямалов [и др.] // Электротехнические комплексы и системы: Международная научно-практическая конференция, Уфа, 27–30 октября 2020 года. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2021.

14. Вентильный электродвигатель для летательных аппаратов вертолетного и самолетного типа / Р. Д. Каримов, И. И. Ямалов, К. А. Барабанов [и др.] // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник научных статей по итогам двенадцатой международной научной конференции, Казань, 30–31 декабря 2020 года. Том Часть 1. – Казань: ООО «Конверт», 2020. – С. 116-118.

Патенты РФ:

15. Патент № 2731017 С1 Российская Федерация, МПК Н02К 16/00, Н02К 11/30. Модульная машина для безредукторного высокомоментного привода: № 2019110871: заявл. 11.04.2019: опубл. 28.08.2020 / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов, К. А. Барабанов [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный авиационный технический университет".

Соискатель



К.А. Барабанов