

Аннотация

"Исследование возможностей применения аддитивной технологии для улучшения конструкции бекзколлекторного электродвигателя» диссертационной работы на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07113 – «Аддитивное производство"

Ибраима Әлібека Саматұлы

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена разработке и экспериментальной проверке применения аддитивных технологий при проектировании бесколлекторных электродвигателей постоянного тока (BLDC), направленных на повышение энергетической эффективности, удельной мощности и тепловой устойчивости при работе под нагрузкой. Исследование ориентировано на преодоление ограничений традиционных технологий производства электрических машин. Выполнен аналитический обзор современных исследований и патентно-технических решений в области электродвигателей BLDC, показавший, что традиционные технологии ограничивают оптимизацию геометрии и интеграцию эффективных систем охлаждения, что приводит к росту тепловых потерь и снижению эффективности при переменных нагрузках. Методологической основой исследования является системный подход к проектированию электродвигателей BLDC, включающий разработанную автором методику оценки энергетической эффективности и снижения мощности под нагрузкой. В работе использованы методы CAD/CAE-моделирования, FEA, CFD и топологической оптимизации. Разработаны параметрические модели статора, ротора и корпуса электродвигателя с учётом ограничений 3D-печати и выполнена комплексная тепловая и электромеханическая оптимизация. Топологическая оптимизация корпусов и теплопроводящих элементов со встроенными каналами охлаждения позволила снизить рабочие температуры и повысить выходную мощность без изменения ротора и силовой электроники. Экспериментальные испытания прототипов подтвердили достоверность расчётных результатов и практическую применимость разработанных решений, что формирует научную и инженерную основу для внедрения аддитивных технологий в электродвигатели BLDC нового поколения.

Актуальность работы

Актуальность диссертационной работы обусловлена ростом требований к энергоэффективности, удельной мощности, массогабаритным показателям и тепловой надёжности бесколлекторных электродвигателей постоянного тока (BLDC), широко применяемых в электромобилях, беспилотных летательных аппаратах и робототехнических системах. Современные условия эксплуатации характеризуются длительной работой при переменных нагрузках и высоких

тепловых потоках при жёстких ограничениях по массе и габаритам, что предъявляет повышенные требования к конструкции электродвигателей. Традиционные технологии производства электрических машин обладают ограниченной гибкостью конструктивных решений и не позволяют эффективно интегрировать системы охлаждения, что приводит к росту тепловых потерь и снижению энергетической эффективности при работе под нагрузкой. Развитие аддитивного производства открывает новые возможности для топологической оптимизации конструкций и улучшения теплоотдачи, однако его внедрение сдерживается отсутствием комплексных методик проектирования. В связи с этим разработка методов проектирования электродвигателей BLDC с применением аддитивных технологий и ориентацией на показатели эффективности является актуальной научно-технической задачей.

В результате диссертационного исследования получены результаты

В результате выполнения диссертационного исследования получен комплекс научных и практических результатов, направленных на повышение энергетической эффективности, тепловой устойчивости и эксплуатационной надёжности бесколлекторных электродвигателей постоянного тока (BLDC), разработанных с использованием технологий аддитивного производства.

Проведён аналитический обзор современных исследований и патентно-технических решений в области электродвигателей BLDC, показавший, что традиционные технологии производства ограничивают возможности оптимизации геометрии и интеграции эффективных систем охлаждения, что приводит к росту тепловых потерь и снижению энергетической эффективности при работе под нагрузкой. На этой основе сформированы требования к аддитивно-ориентированному проектированию электродвигателей с учётом тепловых, механических и электромагнитных факторов.

Обоснован выбор материалов и технологий аддитивного производства для изготовления конструктивных элементов электродвигателей. Установлено, что металлокерамические материалы на основе Al_2O_3 обеспечивают более высокую тепловую стабильность и эффективное пассивное тепловыделение по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами при одинаковых условиях эксплуатации.

Разработаны параметрические CAD/CAE-модели статора, ротора и корпуса электродвигателей BLDC и выполнено комплексное численное моделирование тепловых, механических и электромагнитных процессов методами FEA и CFD. Проведена топологическая оптимизация корпуса и теплопроводящих компонентов со встроенными внутренними каналами охлаждения, что позволило снизить массу конструкции и тепловое сопротивление. Внутренний объём охлаждающих каналов статора увеличен с 26 до 132 мл, обеспечив пятикратное увеличение циркулирующего потока охлаждающей среды.

Разработана и апробирована методика количественной оценки энергетической эффективности электродвигателей BLDC при работе под

нагрузкой, учитывающая тепловое состояние обмоток и изменение электрических параметров. Экспериментально подтверждено, что оптимизация системы охлаждения статора обеспечивает увеличение выходной мощности до 15 % без изменения ротора, применение металлокерамических материалов снижает рабочие температуры до 24 %, а оптимизированный корпус из сплава AlSi10Mg со встроенными охлаждающими каналами позволяет снизить температуру до 30 % и увеличить выходную мощность до 17 %.

Достоверность результатов подтверждена сопоставлением расчётных и экспериментальных данных, а их практическая применимость доказана внедрением разработанных решений в экспериментальные электродвигатели для энергоэффективных транспортных и гоночных установок, что формирует научную и инженерную основу для разработки электродвигателей BLDC нового поколения.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы-Разработка и научное обоснование подходов к применению аддитивных технологий при разработке конструкции электродвигателей постоянного тока без коллектора, обеспечивающих повышение эффективности и снижение энергопотребления при нагрузках

Задачи диссертационной работы

1. Проведение аналитического обзора современных исследований и патентно-технических решений в области аддитивного производства компонентов электродвигателей BLDC с выявлением геометрических, тепловых и технологических ограничений традиционных конструкций и формированием требований к аддитивно-ориентированному проектированию.

2. Обоснование выбора материалов и технологий аддитивного производства для изготовления статора, ротора и корпуса электродвигателя на основе сравнительной оценки полимерных, алюминиевых и металлокерамических материалов по показателям теплопроводности, термостойкости, прочности и технологичности.

3. Разработка параметрических CAD/CAE-моделей статора, ротора и корпуса электродвигателей BLDC с учётом ограничений 3D-печати и выполнение комплексного численного моделирования тепловых, механических и электромагнитных процессов.

4. Осуществление топологической и структурной оптимизации корпуса и теплопроводящих компонентов для снижения массы и теплового сопротивления с внедрением встроенных каналов охлаждения.

5. Разработка и экспериментальная проверка методики оценки энергетической эффективности и прогнозирования снижения мощности электродвигателей BLDC под нагрузкой с анализом технологической и экономической целесообразности аддитивного производства.

Объект исследования

Электродвигатели постоянного тока без коллектора (BLDC), разработанные с использованием дополнительных производственных технологий.

Предмет исследования

Конструктивные, теплоэнергетические характеристики электродвигателей постоянного тока без коллектора, определяющие их эффективность, мощность и устойчивость к нагрузкам при использовании технологий аддитивного производства.

Научное открытие

Разработана методика расчёта коэффициента полезного действия бесколлекторных электродвигателей постоянного тока, позволяющая количественно оценивать снижение мощности и рост энергопотребления при работе под нагрузкой с учётом теплового состояния и электрических параметров обмоток. Установлено, что повышение эффективности системы охлаждения статора за счёт топологической оптимизации и формирования внутренних каналов охлаждения обеспечивает увеличение выходной мощности электродвигателя до 15 % без изменения ротора и других конструктивных элементов. Экспериментально подтверждено, что применение металлокерамических материалов на основе Al_2O_3 , изготовленных методом аддитивного производства, обеспечивает более эффективное пассивное тепловыделение по сравнению с алюминиевыми сплавами, снижая рабочие температуры до 24 %. Впервые выполненная тепловая и структурная оптимизация корпуса из сплава $AlSi10Mg$ со встроенными охлаждающими каналами позволила снизить рабочую температуру до 30 % и увеличить выходную мощность до 17 % по сравнению с базовой конструкцией.

Теоретическая значимость работы

Разработана методика расчета энергетической эффективности электродвигателей постоянного тока без коллектора, позволяющая количественно определить коэффициент полезного действия электродвигателя и снижение мощности при нагрузке с учетом тепловых и электрических параметров.

Получены теоретические зависимости геометрии систем охлаждения и топологической оптимизации элементов конструкции от тепловых режимов и влияния постоянного тока на допустимую плотность мощности электродвигателей без коллектора.

Закономерности теплопередачи в аддитивно произведенных элементах электродвигателей BLDC, изготовленных из алюминия и металлокерамических материалов, определяют их тепловую стабильность и энергоэффективность при пассивном охлаждении.

Практическая значимость результатов работы

Разработанная методика расчета эффективности и снижения мощности электродвигателей постоянного тока без коллектора может быть использована при проектировании и модернизации электродвигателей BLDC для оценки их энергоэффективности на этапе цифрового проектирования.

Топологически оптимизированные конструкции статоров и корпусов электродвигателей, выполненные дополнительными методами производства, позволяют увеличить выходную мощность электродвигателей до 17% без изменения ротора и силовой электроники только за счет замены конструктивных элементов системы охлаждения.

Полученные результаты по применению металлокерамических материалов на основе Al_2O_3 , произведенных методом 3D-печати, могут быть использованы при разработке электродвигателей с пассивным охлаждением, обеспечивающих более эффективное тепловыделение по сравнению со стандартными алюминиевыми сплавами.

Разработанные и оптимизированные корпуса электродвигателей, изготовленные из сплава $AlSi10Mg$ с внутренними охлаждающими каналами, могут быть включены в практику проектирования и производства электродвигателей для электромобилей, беспилотных летательных аппаратов и энергосберегающих электроприводов.

Методика и методы исследования

Методологической основой исследования является системный подход к проектированию электродвигателей постоянного тока без коллектора с применением аддитивных технологий, включающий разработанную методику расчета энергетической эффективности и снижения мощности при работе под нагрузкой. В работе используются аналитические методы теории электрических машин, методы численного моделирования (FEA, CFD), топологической оптимизации, параметрического моделирования САПР и сравнительного анализа материалов, применяемых для аддитивного производства компонентов электродвигателей.

Научные положения, выносимые на защиту

1. методика расчета энергетической эффективности электродвигателей постоянного тока без коллектора с учетом теплового состояния обмоток и конструктивных особенностей двигателя позволяет количественно определить коэффициент полезного действия и прогнозировать снижение мощности при работе электродвигателя под нагрузкой.

2. используя топологическую оптимизацию (Generative design) и метод аддитивного производства внутренних охлаждающих каналов, внутренний объем статора и стандартного статора увеличился с 26 миллилитров до 132 миллилитров, а внутренний циркулирующий поток воды увеличился в 5 раз.

3. Использование металлокерамических материалов на основе Al_2O_3 , изготовленных методом 3D-печати, обеспечивает более эффективное пассивное тепловыделение по сравнению со стандартными алюминиевыми сплавами, снижение рабочей температуры электродвигателя достигает 24% при тех же условиях эксплуатации.

4. тепловая и структурная оптимизация корпуса электродвигателя из сплава $AlSi10Mg$ с внутренними охлаждающими каналами, изготовленными методом

дополнительного производства, приводит к снижению рабочей температуры до 30% и увеличению выходной мощности электродвигателя до 17% по сравнению с традиционной конструкцией.

Степень надежности и тестирование результатов

Достоверность научных результатов

Достоверность научных результатов обеспечивается применением обоснованных теоретических положений теории электрических машин, применением методов численного моделирования (FEA, CFD) и топологической оптимизации, а также сопоставлением проектируемых данных с результатами экспериментальных исследований и испытаний прототипов электродвигателей.

Апробация результатов работ и публикаций

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, были представлены на инженерном конкурсе по созданию высокоэнергетических автомобилей Shell Eco-Marathon Asia, Pacific and Middle East 2024, который проходил со 2 по 6 июля 2024 года в Индонезии (о. Ломбок). В рамках соревнований был продемонстрирован электродвигатель, изготовленный методом аддитивного производства по технологии FDM (Fused Deposition Modeling).

По результатам диссертационного исследования опубликованы две научные статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, а также четыре статьи в научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в области науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан. Кроме того, по материалам диссертации зарегистрирован один патент на изобретение, подтверждающий научную и практическую значимость полученных результатов; еще два патента прошли экспертизу.

Практическая реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы были реализованы при проектировании и изготовлении аддитивно изготовленных компонентов электродвигателей постоянного тока без коллекторов и включены в экспериментальные образцы электродвигателей, использованных в энергоэффективных прототипах, подготовленных для участия в гонках Shell Eco-marathon, а также в гоночных болидах студенческой инженерной серии formula Student, где обеспечено снижение массы, улучшение тепловых режимов и повышение энергетической эффективности. станции.

Структура и Объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация состоит из 128 страниц, 40 рисунков, 13 таблиц, 76 библиографических источников.