

На правах рукописи



Солдатов Александр Викторович

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ПРОИЗВОДСТВА МАЛОИНЕРЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОЛЫМ ЯКОРЕМ ДЛЯ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ**

2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский Федеральный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент,
Хацаюк Максим Юрьевич

Официальные оппоненты: **Коняев Андрей Юрьевич**, доктор технических наук, профессор; федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра электротехники, профессор;

Москалев Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», кафедра электрических машин и общей электротехники, доцент.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится «21» января 2026 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.2.404.12, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660074, ул. Киренского, 26, корпус №14 ауд. 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <https://sfu.ru/ru/science/dissertations/6446c404-1e39-4b9b-8296-e05159062fb1>

Автореферат разослан «___» ___ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы заключается в необходимости разработки малоинерционных электродвигателей, используемых в следящих системах изделий вооружения военной и специальной техники, которые могли бы соответствовать современным требованиям. В сложившейся геополитической ситуации существует дефицит импортных электродвигателей для высокотехнологичных позиционных следящих систем, а отсутствие аналогов на российском рынке затрудняет своевременную поставку продукции специального назначения в рамках государственного оборонного заказа.

Для обеспечения связью вооруженные силы РФ в тактическом звене зачастую применяются малогабаритные (носимые) станции спутниковой связи или станции, работающие в движении. Станции второго типа имеют антенные модули с электромеханическим управлением для осуществления наведения и автосопровождения сигнала в условиях движения транспортной базы. Основным исполнительным механизмом при наведении в данном случае является электропривод.

Важнейшими функциональными параметрами, определяющими технический уровень следящего электропривода, являются массогабаритные, электромеханические и энергетические показатели, используемого электродвигателя. Существующие отечественные электродвигатели уже не соответствуют современным требованиям, предъявляемым к следящим системам, в основном это связано с большей массой электродвигателей по сравнению с импортными аналогами.

Вопросам разработки и исследования малоинерционных электродвигателей посвящено множество работ, среди которых А.Л. Встовский, В.Т. Кафтанатий, А.А. Соловьев, Н.В. Хомяк, Л.Н. Титова, К.Т. Нгуен, Р.А. Романов, G. Burnand, B. Dehez, S. Jumayev и др.

Однако развитие мм-диапазона дополнительно повлекло повышение требований к стабилизации спутниковых систем, работающих в движении. С учетом узкой ширины диаграммы направленности, имеется сложность в наведении на космический аппарат и сопровождении сигнала при заданных эволюциях транспортной базы. Допустимая ошибка при наведении должна составлять не более 5-30 угловых минут, в зависимости от площади излучения антенны.

Таким образом использование импортной техники оказалось более целесообразным при проектировании прецизионного интеллектуального электропривода.

На сегодняшний день задача импортозамещения является особо актуальной. Это касается не только сферы разработки, но и производства специализированных электрических машин для высокотехнологичных позиционных следящих систем. В основном это связано с отсутствием автоматизации при изготовлении малоинерционных электродвигателей.

В связи с этим, актуальной научной задачей является исследование и разработка малоинерционных электродвигателей для антенных устройств станций спутниковой связи, позволяющих выдерживать современные требования, предъявляемые к такого рода технике, а также разработка оптимальных способов изготовления обмоток данных двигателей, для повышения автоматизации производства.

Объект исследования – малоинерционный электродвигатель постоянного тока с полым якорем.

Предмет исследования – методика проектирования и технология производства малоинерционных электродвигателей постоянного тока с полым якорем для следящих систем.

Цель работы – разработка и исследование малоинерционного электродвигателя постоянного тока с полым якорем для применения в антенных модулях станций спутниковой связи, работающих в движении, и верификация методики его проектирования.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие **задачи**:

1. Анализ существующих технических решений по выбору типа обмоток, современных магнитов на основе редкоземельных материалов (РЗМ), конструктивные особенности построения коллектора для создания электродвигателей, используемых в качестве исполнительных механизмов для объектов специальной техники.

2. Разработка математической модели магнитного и теплового полей электродвигателя.

3. Расчет параметров электродвигателя с полым якорем с использованием современных методов численного моделирования.

4. Разработка конструкции и технологии изготовления электродвигателя постоянного тока с полым якорем.

5. Проведение экспериментальных исследований и испытаний полученного образца для определения возможности использования в станциях спутниковой связи, работающих в движении при жестких условиях эксплуатации.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель электродвигателя с полым якорем, в части определения коэффициента краевого эффекта.

2. На основании проведенных исследований уточнена классическая методика проектирования электродвигателей с полым якорем в части введения коэффициента краевого эффекта для определения рабочего магнитного потока.

3. Научно обоснована и разработана технология изготовления обмотки полого якоря на основе гибких печатных плат с применением двойного наращивания меди для увеличения толщины проводящего слоя.

Практическая значимость работы:

1. Изготовлены опытные образцы малоинерционных электродвигателей постоянного тока с полым якорем из медной и алюминиевой обмотки.

2. Изготовлены опытные образцы малоинерционных электродвигателей постоянного тока с применением гибких печатных плат в качестве обмотки полого якоря.

3. По результатам экспериментальных исследований подтверждена возможность серийного производства малоинерционных электродвигателей постоянного тока с полым якорем.

4. Получен патент на промышленный образец и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ для проведения экспресс-расчета параметров электродвигателей.

Полученные теоретические и практические результаты диссертационной работы внедрены на предприятии АО «НПП «Радиосвязь», что подтверждено соответствующим актом.

Методология и методы исследования. За основу для решения поставленных задач была взята теория электрических машин с использованием современных средств

численного моделирования магнитных полей, с помощью программного комплекса ANSYS. Анализ теплового поля произведен в модуле Flow Simulation комплекса SolidWorks. Разработка инженерной методики проектирования электродвигателя велась в среде Matlab. Обработка результатов расчётов произведена с помощью программного средства MATHCAD. Экспериментальным путем был проведен анализ характеристик электродвигателей с использованием разработанного стенда, проведены испытания по разработанной методике на наработку, сохраняемость и воздействия различных климатических факторов.

Достоверность полученных результатов обусловлена сравнением результатов математического моделирования и экспериментальных исследований рабочих характеристик электродвигателей постоянного тока с полым якорем. Точность математической модели ограничена принятыми допущениями и количеством исследуемых областей. Точность экспериментальных данных определяется точностью измерительных приборов, а также техническими возможностями и качеством изготовления стенда.

Автор защищает следующие положения:

1. Результаты анализа технических решений по выбору типа конструкций электродвигателей для применения в антенных модулях станций спутниковой связи, работающих в движении.

2. Математические модели малоинерционного электродвигателя постоянного тока с полым якорем.

3. Конструкции и технологии изготовления малоинерционного электродвигателя постоянного тока с полым якорем и обмотками из классической медной проволоки, алюминиевой проволоки сплава Al-Zr-Ni и обмотки на основе гибких печатных плат.

4. Результаты экспериментальных исследований рабочих характеристик электродвигателя и верификация расчетных моделей.

Личный вклад автора заключается в проведении исследований, разработке математической модели магнитного поля электродвигателя, с помощью которой была уточнена инженерная методика проектирования электродвигателей с полым якорем путем введения коэффициента краевого эффекта. Разработана конструкция электродвигателя с полым якорем из классической проволочной обмотки и обмотки на основе гибких печатных плат. Разработана технология изготовления обмотки полого якоря. Проведены испытания и подтверждена возможность использования уточненной инженерной методики для проведения экспресс-расчета параметров электродвигателей данного типа.

Соответствие диссертации паспорту специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы».

Диссертационная работа соответствует:

– 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 промышленного назначения.

– п.2. Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов.

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

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на VIII и IX Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации», на научно-технических совещаниях в АО «НПП «Радиосвязь».

Публикации. По результатам исследований опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 патент на промышленный образец, 3 публикации в прочих изданиях.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 118 страницах машинописного текста и включает введение, четыре главы основного текста, заключения, библиографического текста из 79 наименований и 4 приложений. Работа проиллюстрирована 61 рисунком и 22 таблицами. Приложения занимают 13 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, представлены научная новизна и положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе проведен анализ применяемых электродвигателей в следящих системах на примере антенных модулей станций спутниковой связи. Рассмотрены конструктивные особенности электродвигателей с пазовым, гладким, дисковым и полым якорем.

Проанализированы виды и строение обмоток, а также конструкции постоянных магнитов. Установлено, что для выполнения требований, предъявляемых к современным следящим системам, наиболее актуальным направлением является разработка и исследование малоинерционных электродвигателей с полым якорем. Они обладают более высокими энергетическими показателями, широким диапазоном регулирования скоростей, наиболее оптимальными массогабаритными характеристиками.

Учитывая существующие технологии на территории Российской Федерации по изготовлению электродвигателей с полым якорем, существует необходимость в разработке новых способов изготовления обмоток данных двигателей, для повышения автоматизации производства и обеспечения высоких функциональных и рабочих характеристик.

Во второй главе приведена математическая модель электродвигателя с полым якорем, основанная на известных электромагнитных соотношениях из общей электротехники и адаптированная под особенности конструкции данных электродвигателей. Для расчета магнитной цепи электродвигателя была построена расчетная модель, представленная на рисунке 1.

Граничные условия:

1. Касательная составляющая магнитного потенциала \bar{A} вне границы расчетной области равна 0.

2. На границе раздела сред тангенциальная компонента векторного магнитного потенциала непрерывна $A_{\tau 1} = A_{\tau 2}$.

3. Нормальная компонента магнитной индукции непрерывна на границе
 $(\text{rot } \overline{A_1})_n = (\text{rot } \overline{A_2})_n$

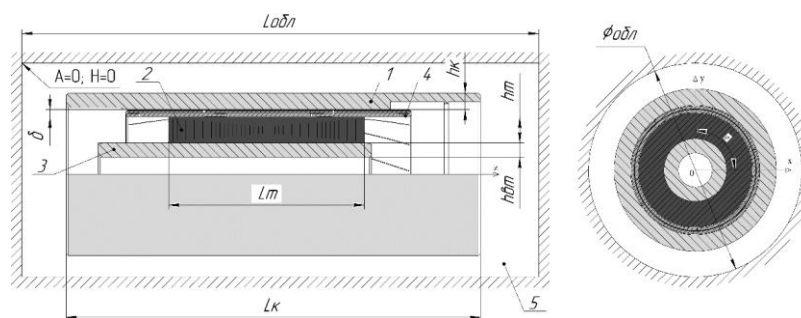


Рисунок 1 – Расчетная модель для анализа магнитостатического поля:
 1 – корпус; 2 – магнит; 3 – магнитная втулка; 4 – обмотка; 5 – воздушная среда

Согласно классической методике, для расчета подобных микромашин рабочий магнитный поток рассчитывается по классической формуле:

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta} \cdot \alpha \cdot \tau \cdot L_m, \quad (1)$$

где α – коэффициент полюсного перекрытия, который берется в диапазоне 0,6-0,8.

Индукция в воздушном зазоре определяется согласно:

$$B_{\delta} = \frac{B_m}{\sigma} \cdot \frac{S_m}{S_{\delta}}. \quad (2)$$

Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi D_m}{2p}. \quad (3)$$

Площадь поверхности полюса:

$$S_m = b_p \cdot L_p. \quad (4)$$

Площадь воздушного зазора:

$$S_{\delta} = \alpha \frac{\pi(D_m + \delta)}{2p} (L_m + 2\delta). \quad (5)$$

При аналитическом расчете и решении магнитной и электромагнитной задач в двумерной постановке рабочую длину индуктора, создающего рабочий магнитный поток, приравнивают к реальной длине индуктора, пренебрегая краевыми эффектами, за счет которых указанные длины не равны друг другу, что приводит к неточному определению рабочего магнитного потока и, следовательно, к неточному прогнозированию рабочих характеристик проектируемого электродвигателя.

С учетом того, что классическая модель электромагнитного поля не учитывает особенности конструкции электрической машины, приводящие к неравномерному распределению линий индукции магнитного поля и краевые эффекты, задача расчета электромагнитного поля решается численным моделированием, выполненным в программе Ansys Maxwell.

В результате численного моделирования магнитной системы электродвигателя в трехмерной постановке получаем график распределения магнитной индукции по длине корпуса L_k (по оси X , мм) и длине окружности L , радиус которой равен среднему значению между внешним диаметром D_m постоянного магнита и внутренним диаметром корпуса.

График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре представлен на рисунке 2.

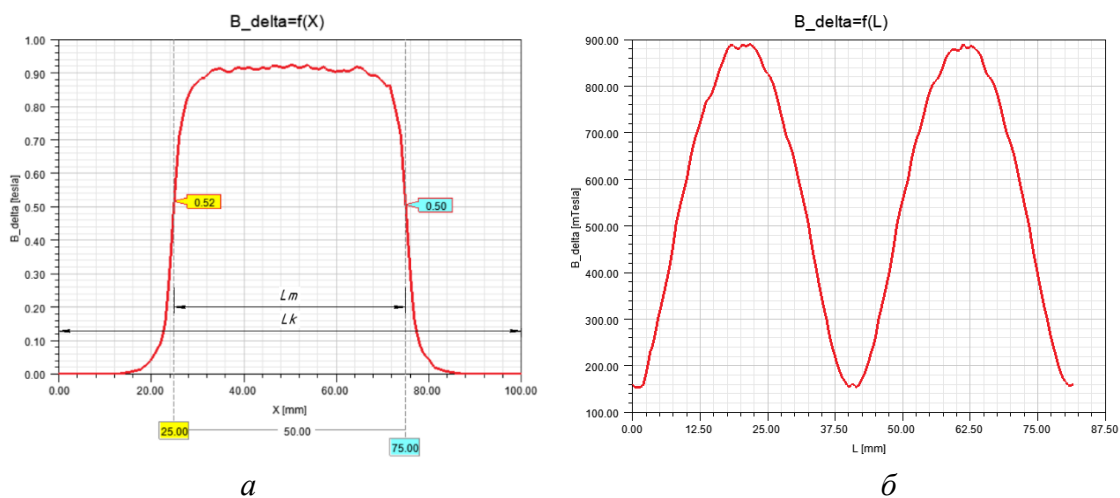


Рисунок 2 - Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре: a – по длине корпуса L_k ; b – по длине окружности L

Исходя из рисунка 1, b , коэффициент полюсного перекрытия $\alpha = 0,635383 (\approx \frac{2}{\pi})$.

Далее были проведены исследования зависимости магнитной индукции от геометрии магнитной системы электродвигателя $B_{\delta} = f(L_k, h_k, D_m, d_m, \delta, L_m)$. По результатам исследования на рисунке 3 представлена зависимость коэффициента полюсного перекрытия от геометрии магнитной системы (количество точек N в выборке).

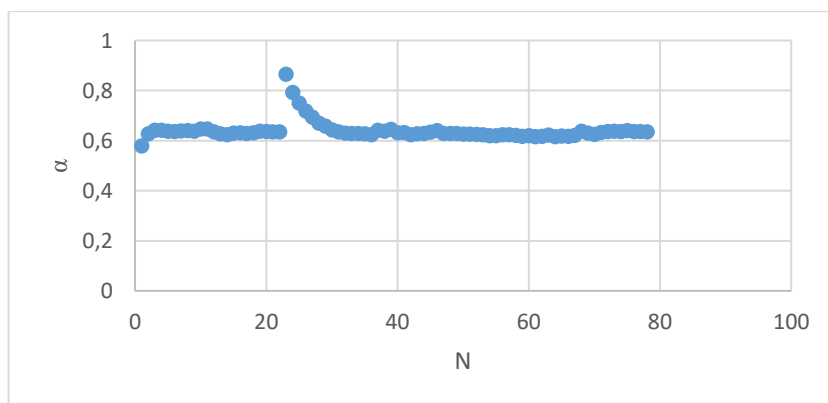


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента полюсного перекрытия

$$\alpha = f(L_k, h_k, D_m, d_m, \delta, L_m)$$

На рисунке 3 имеются точки, которые дальше всех отдалены от остальных. Эти точки получены при насыщенном магнитопроводе. Таким образом, среднее значение коэффициента полюсного перекрытия $\alpha \sim 0,63$. Относительная погрешность по отношению к $\frac{2}{\pi}$ менее 1,05 %.

Результаты показали, что коэффициент полюсного перекрытия не зависит от магнитной системы электродвигателя, а зависит лишь от формы индуктора, в нашем случае от постоянного магнита, при условии, что магнитная цепь находится в ненасыщенном состоянии.

На основании графиков распределения магнитной индукции по длине корпуса найдены удельные магнитные потоки $\frac{\Phi'_\delta}{\tau}$ (удельный магнитный поток на единицу длины полюсной дуги, Вб/м) по всей длине обмотки для коллекторных электродвигателей с полым якорем с помощью метода трапеций по формуле:

$$\frac{\Phi'_\delta}{\tau} = \sum_{i=1}^n \frac{B_{\delta_i} + B_{\delta_{i-1}}}{2} \cdot h, \quad (6)$$

где i – номер текущего интервала; n – количество интервалов (трапеций); B_{δ_i} – значение индукции в воздушном зазоре в текущем интервале, Тл; $B_{\delta_{i-1}}$ – значение индукции в воздушном зазоре в предыдущем интервале, Тл; h – ширина интервала (от общей длины обмотки без учета лобовых частей), мм.

По результатам расчетов выведены отношения между реальным удельным магнитным потоком с учетом краевого эффекта $\frac{\Phi'_\delta}{\tau}$ и расчетным удельным магнитным потоком $\frac{\Phi_\delta}{\tau} = \frac{B_{\text{ср}} \cdot L_m}{\tau}$ в виде коэффициента краевого эффекта. На рисунке 4 представлена зависимость коэффициента краевого эффекта от геометрии магнитной системы (количество точек N в выборке).

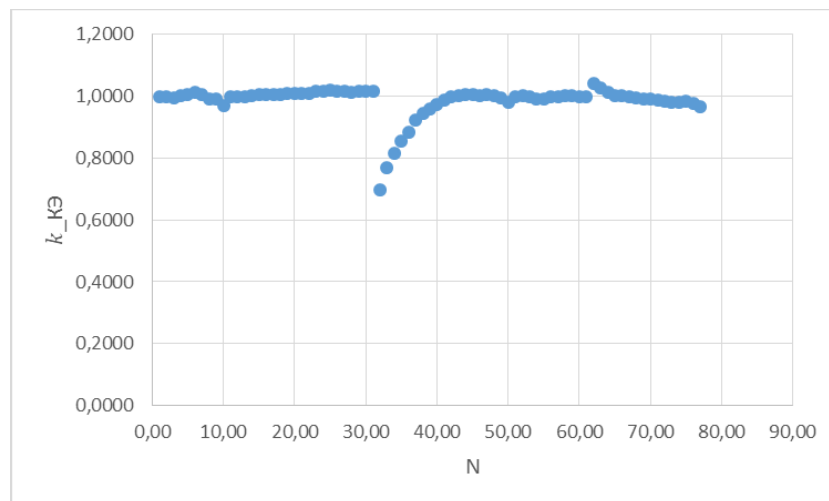


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента краевого эффекта

$$k_{кэ} = f(L_k, h_k, D_m, d_m, \delta, L_m)$$

На рисунке 4 имеются точки, которые дальше всех отдалены от остальных. Эти точки получены при насыщенном магнитопроводе и не были учтены. Таким образом, коэффициент краевого эффекта $k_{кэ}$ находится в диапазоне 0,96...0,98.

Результаты показали, что коэффициент краевого эффекта слабо зависит от магнитной системы электродвигателя при условии, что магнитная цепь находится в ненасыщенном состоянии.

Таким образом, уточненная формула для определения рабочего магнитного потока с учетом краевого эффекта будет иметь вид:

$$\Phi_{\delta} = k_{кэ} \cdot B_{\delta max} \cdot \alpha \cdot \tau \cdot L_m . \quad (7)$$

С введением данного коэффициента, была уточнена классическая методика проектирования электродвигателей с полым якорем. Полученные результаты позволяют провести более точный экспресс-анализ характеристик электродвигателей данного типа.

Определение температуры основных элементов двигателя достигается через численное решение сопряженной задачи теплопроводности и массообмена. Тепловой баланс в системе зависит от мощности тепловыделения в двигателе и условий теплообмена с окружающей средой. При этом характер потоков, а соответственно и интенсивность теплообмена, зависят от расположения двигателя относительно вектора силы тяжести. Очевидно, что вокруг корпуса двигателя формируется неоднородный газодинамический поток с изменяющейся по мере продвижения температурой и скоростью. Соответственно, решение задачи с применением справочного коэффициента теплоотдачи может давать результаты по температуре двигателя со значительной ошибкой, учет которой, в свою очередь, будет приводить при проектировании либо к занижению проектной мощности, либо к неоправданному увеличению массогабаритных показателей.

Несмотря на возможность упрощения конструкции двигателя до осевой симметрии, очевидно, что при любой пространственной ориентации двигателя, отличной от вертикальной, формирующиеся потоки осевой симметрией обладать не будут. В связи с этим задача должна быть решена в трехмерной постановке в прямоугольной системе координат.

Таким образом, для решения тепловой задачи, были приняты следующие допущения:

1. Температурное поле исследуется в установившемся режиме ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$).
2. Газ рассматривается как несжимаемый (число Кнудсена $K_n \ll 1$). Для учета термоконвективных процессов используется приближение Буссинеска – Обербека (число Рэлея $Ra \gg Ra_{кр}$).
3. Влиянием температуры на электрофизические свойства материалов пренебрегается (обратная связь отсутствует $\gamma, \mu = 0$).
4. Несущественные конструктивные элементы и элементы с низким термическим сопротивлением исключены из расчета.
5. Турбулентные пульсации скорости осредняются и учитываются на уровне их кинетической энергии.

Расчетная модель термогазодинамической задачи представлена на рисунке 5.

Система дифференциальных уравнений, описывающих термогазодинамические процессы с учетом принятых допущений, состоит из уравнений неразрывности, движения и энергии:

$$\nabla \bar{v} = 0, \quad (8)$$

$$\rho \left((\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} \right) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \bar{f}_g, \quad (9)$$

$$\rho \left(\nabla (h \bar{v}) \right) = \nabla (\lambda_{eff} \nabla T) + p_e, \quad (10)$$

где $\bar{\tau} = \eta \nabla \bar{v} - \rho \bar{v}' \cdot \bar{v}'$ – тензор вязких напряжений; \bar{v} – осредненный во времени вектор скорости; \bar{v}' – пульсационная составляющая вектора скорости; $\rho \bar{v}' \cdot \bar{v}'$ – турбулентные напряжения Рейнольдса; $h = cT$ – удельное теплосодержание (энтальпия); T – температура; $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$ – эффективная теплопроводность; λ_t – турбулентная теплопроводность; \bar{f}_g – вектор объемной силы тяжести; p_e – объемная Джоулева мощность.

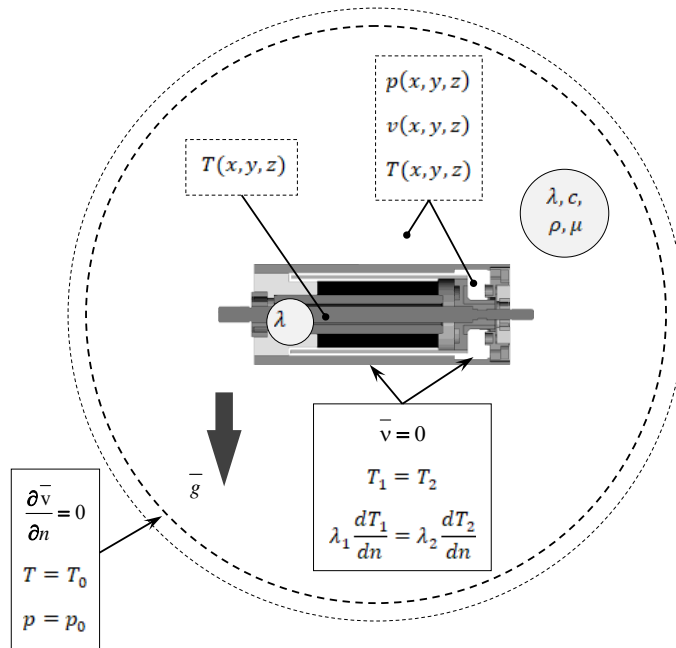


Рисунок 5 – Постановка термогазодинамической задачи

Для учета свободноконвективных движений используется приближение Обербека-Буссинеска. В данном приближении зависимость плотности от температуры линейризуется и учитывается лишь при массовых силах:

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)), \quad (11)$$

где ρ_0 – плотность жидкости при температуре T_0 ; β – коэффициент объемного расширения.

Для моделирования турбулентности применяется RANS подход, в частности двухпараметрическая модель *k-ε*. Применение данных моделей является стандартной процедурой и их математическое описание широко представлено в литературе, в связи с чем в данной работе их дополнительное описание не требуется. Уравнения выше записаны с учетом данного подхода.

При решении задачи теплообмена в твердых телах система уравнений 8-10 записывается с учетом $\bar{v} = 0$, что фактически дает стационарное уравнение теплопроводности с учетом объемной мощности тепловыделения.

Построение геометрической модели проводилось в SolidWorks при выбранных базовых геометрических параметрах. При этом задача дополняется внешней расчетной областью с размерами, достаточными для исключения влияния граничных условий (не менее 3 габаритных размеров тела).

Для замыкания системы уравнений задача дополняется граничными условиями. На внешних границах области окружения используется условия открытой границы, состоящие из условия Дирихле для давления и температуры и Неймана для скорости:

$$\rho = \rho_0, T = T_0, \frac{\partial \bar{v}}{\partial n} = 0. \quad (12)$$

На внутренних границах «газ – тело» применяется условие прилипания для газодинамической задачи и на границах «газ – тело», «тело – тело» условие сопряжения для тепловой:

$$\bar{v} = 0, T_1 = T_2, \lambda_1 \frac{dT_1}{dn} = \lambda_2 \frac{dT_2}{dn}. \quad (13)$$

При этом, для учета вращения обмотки относительно остальных элементов двигателя с учетом наклона оси, условие прилипания на соответствующей границе задается через определение касательных компонент скорости по угловой скорости:

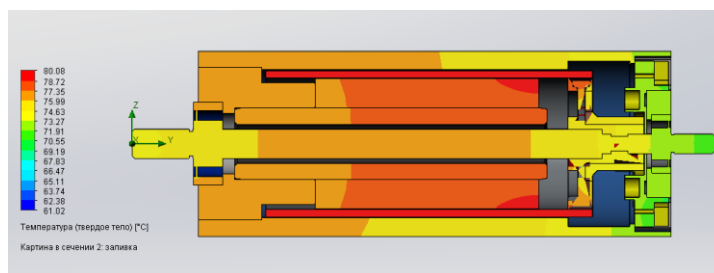
$$\bar{v} = \bar{\omega} \times \bar{R}. \quad (14)$$

Для учета источников движения и тепла в уравнениях 2.17 и 2.18 задаётся объемная сила тяжести (с учетом условия 2.19) и объемный источник тепловыделения. Соответственно:

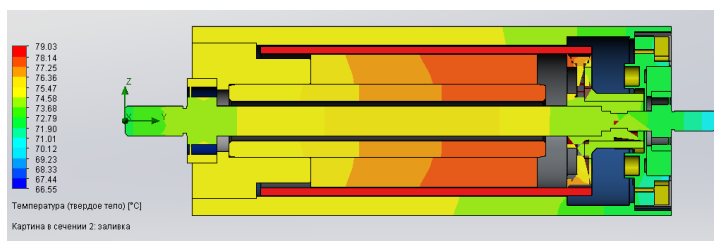
$$\bar{f}_g = \rho(T) \bar{g}, p_e = \gamma |\bar{E}|^2. \quad (15)$$

Учитывая, что электродвигатель может быть установлен в конечном изделии в разных положениях, для однозначного определения теплового поля решалась гидрогазодинамическая задача. Имитация положения в пространстве производилась за счет изменения направления гравитации.

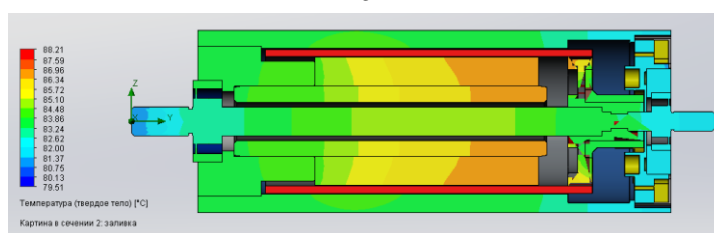
На рисунке 6 представлено распределение теплового поля электродвигателя в твердом теле. Полученные значения сведены в таблицу 2.



a



б



в

Рисунок 6 – Распределение температурного поля двигателя в зависимости от положения:
a – при 0°, *б* – при 45°, *в* – при 90°

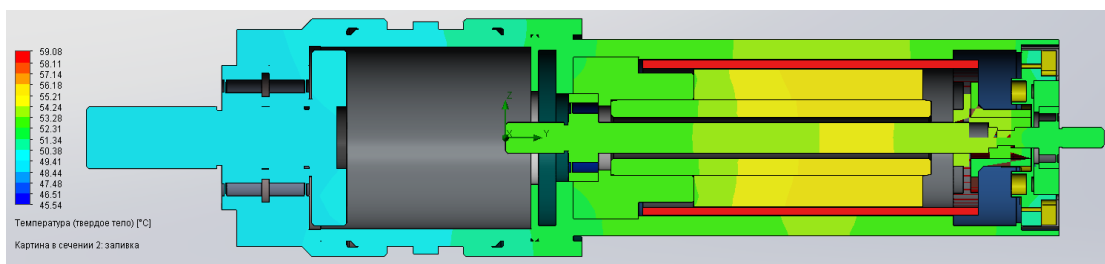
Расчеты в программе Flow simulation показали, что с торцов обмотки якоря приходится в сумме менее 1% теплового потока, 47% теплового потока уходит через корпус наружу, а 52% теплового потока проходит через магнит. Это объясняет, почему магнит сильнее нагревается, чем корпус. Температура в обмотке составляет 81,5 °С, что подтверждает возможность использования медного эмалированного провода ПЭТВ-2 (допустимая температура эксплуатации 200 °С).

Таблица 2 – Результаты численного моделирования теплового поля

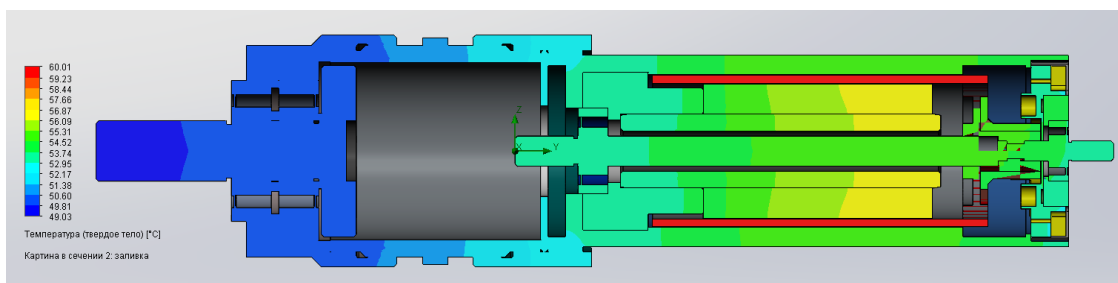
Положение двигателя	Значение температуры, °С		Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² К	
	Польный якорь	Корпус	Польный якорь	Корпус
0°	80	75	13	8
45°	79	74	13,2	8,6
90°	88	84	10	7,2

Далее был проведен тепловой анализ электродвигателя с использованием редуктора. Данный анализ имитирует расположение двигателя в конечном изделии (рисунок 7).

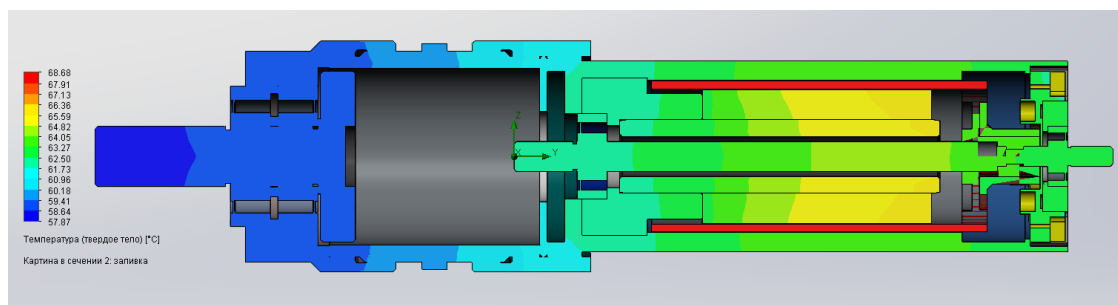
Исходя из полученных результатов (таблица 3), изменение температуры составило около 20°. Таким образом для получения более достоверных данных необходимо учитывать, каким образом будет установлен электродвигатель в конечном изделии.



a



б



в

Рисунок 7 – Распределение температурного поля двигателя с редуктором в твердом теле: *a* – при 0°, *б* – при 45°, *в* – при 90°

Таблица 3 – Результаты теплового моделирования электродвигателя с редуктором

Положение двигателя	Значение температуры, °C	
	Полый якорь	Корпус
0°	59	51
45°	60	53
90°	68	62

Для нахождения температуры в обмотке по классической методике, необходимо учитывать коэффициент теплоотдачи, который можно найти численным моделированием.

В итоге, по результатам численного моделирования, были получены коэффициенты теплоотдачи на разных поверхностях электродвигателя и тем самым уточнена классическая инженерная методика расчета.

Для сравнения результатов исследования характеристик разрабатываемого электродвигателя, дополнительно был проведен численный анализ в программе Ansys Maxwell. В таблице 4 представлены результаты расчета электродвигателя, выполненного по классической инженерной методике, уточненной методике и численным моделированием.

Таблица 4 – Результаты численного моделирования рабочих характеристик

Параметр	Инженерная методика	Численное моделирование	Инженерная методика (уточненная)
Напряжение, В	27		
Частота вращения холостого хода, об/мин	8108	7609	7500
Номинальная частота вращения, об/мин	7497	6653	6674
Пусковой момент, Нм	1,43	1,24	1,43
Пусковой ток, А	41,5	37,4	41,5
Номинальный момент, Нм	0,129		
Номинальный ток, А	4,26	4,06	4,1
Электромеханическая постоянная времени, мс	6,25	5,1	5
Полезная мощность, Вт	101,3	92,77	91,8
Потребляемая мощность, Вт	109,5	109,6	110,7
КПД, %	88	85	83
Перегрузочная способность	3	1,9	2,1
Максимальная рабочая температура (изоляция провода), °С	120		
Удельная мощность, Вт/ кг	155,8	136,4	129,3

В результате проведенных исследований относительная погрешность по основным параметрам математической модели двигателя при численном моделировании и расчете по уточненной инженерной методике не превысила 4 %.

Третья глава посвящена разработке конструкции электродвигателей и отработке технологии изготовления. На основе расчетных данных, представленных во второй главе, были разработаны и изготовлены опытные образцы электродвигателей.

При проектировании конструкции двигателя были учтены особенности технологии изготовления полого якоря. С учетом отсутствия полной автоматизации процесса изготовления обмотки, была разработана специальная оснастка для снижения трудоемкости изготовления. Секции обмоток изготавливают в виде отдельных шаблонов или непрерывным наматыванием на технологическую оснастку медным проводом круглого сечения. В качестве связующего ламелей и вала двигателя является полиамид, который заливается в специальную оснастку. Образцы изготовленных полых якорей представлены на рисунке 8.



Рисунок 8 – Пोलый якорь с ромбовидной обмоткой:
а – медная проволока; *б* – алюминиевая проволока

Указанные методы намотки обладают следующими недостатками:

- при формировании обмотки с максимально возможным заполнением не всегда удается равномерно разместить витки по окружности, что приводит к намотке витков с различной плотностью и расположением, из-за чего увеличиваются габариты обмотки и всего электродвигателя;
- трудоемкость в намотке при большом количестве проводников в обмотке, особенно при ручной намотке;
- низкий коэффициент заполнения сечения секции обмотки изолированным проводом в диапазоне 0,4-0,6.

Кроме двигателя с классической обмоткой из медного провода были разработаны и изготовлены образцы с принципиально новым подходом, в котором в качестве обмотки полого ротора использовались гибкие печатные платы. По расчетам обмоточных данных построен эскиз печатной обмотки ромбовидной формы секции, представленный на рисунке 9.

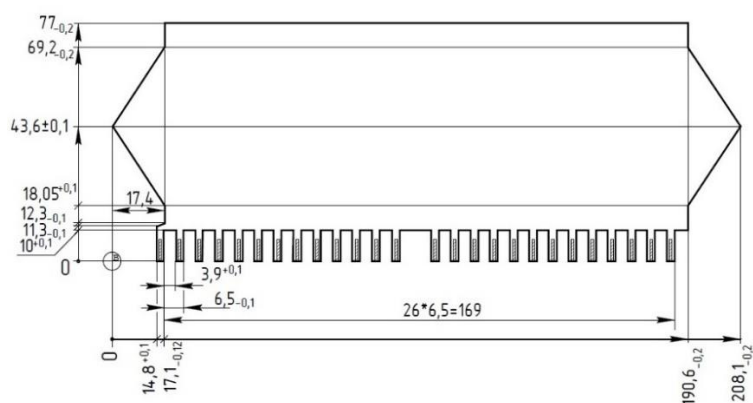


Рисунок 9 – Эскиз печатной обмотки ромбовидной формы секции

Медные дорожки выполнены с двух сторон полиамидной подложки с переходными металлизированными отверстиями для их электрического соединения. Металлизированные выводные дорожки спаиваются между собой перемычками таким образом, чтобы получилась петлевая обмотка для коллекторного двигателя постоянного тока.

На рисунке 10 представлена краткая блок-схема технологического процесса изготовления обмотки на основе гибких печатных плат. После разработки и отладки технологического процесса, были изготовлены образцы гибких печатных плат в качестве обмотки полого якоря.

Печатный способ изготовления обмоток более технологичен и обладает высокой повторяемостью, а изготовление более точное по сравнению с изготовлением классических обмоток медным или алюминиевым проводом круглого сечения. Данный технологический процесс позволяет существенно уменьшить трудоемкость и время изготовления конечного



Рисунок 10 – Краткая блок-схема технологического процесса изготовления ГПП

изделия. Особенность технологического процесса и оборудования при производстве печатных плат позволяет изготовить 72 обмотки в течении 4-х рабочих смен с последующим ежедневным выпуском аналогичного объема.

После разработки и отладки технологического процесса, были изготовлены образцы гибких печатных плат в качестве обмотки полого якоря. Изготовленный образец представлен на рисунке 11.

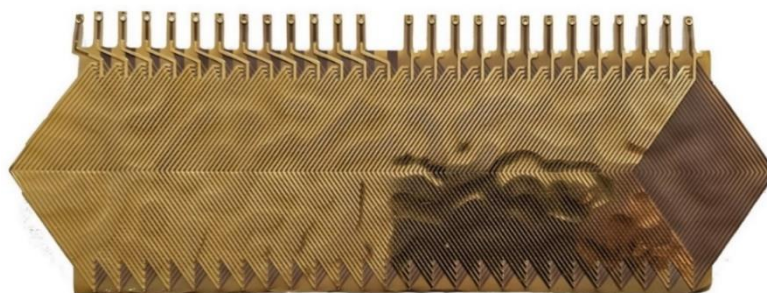


Рисунок 11 – Образец обмотки на основе гибкой печатной платы

В четвертой главе для верификации полученных при предварительном расчете параметров электродвигателей был спроектирован и изготовлен испытательный лабораторный стенд, моделирующий нагрузку на валу испытуемого электродвигателя и выводящий его рабочие параметры на дисплей. Строение стенда представлено на рисунках 12-13.

Для верификации полученных параметров электродвигателей методами, описанными в главе 2, был проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования и расчета по уточненной инженерной методике с реальными значениями (таблица 5). За основу была взята обмотка полого якоря, выполненная из медного эмалированного провода марки ПЭТВ-2.

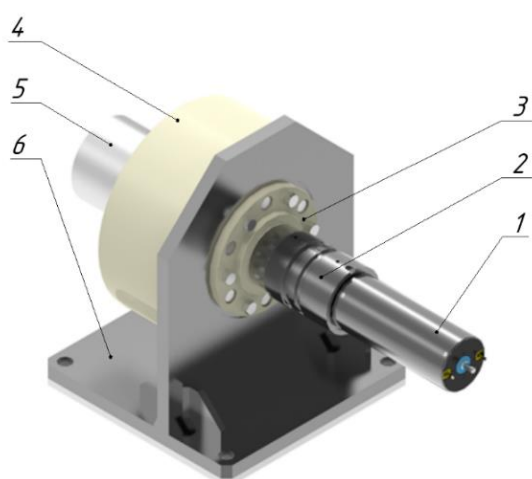


Рисунок 12 – Лабораторный стенд:

- 1 – испытуемый электродвигатель собственного производства;
- 2 – планетарный редуктор собственного производства;
- 3 – фланец;
- 4 – электромагнитный тормоз;
- 5 – инкрементальный энкодер;
- 6 – опора лабораторного стенда

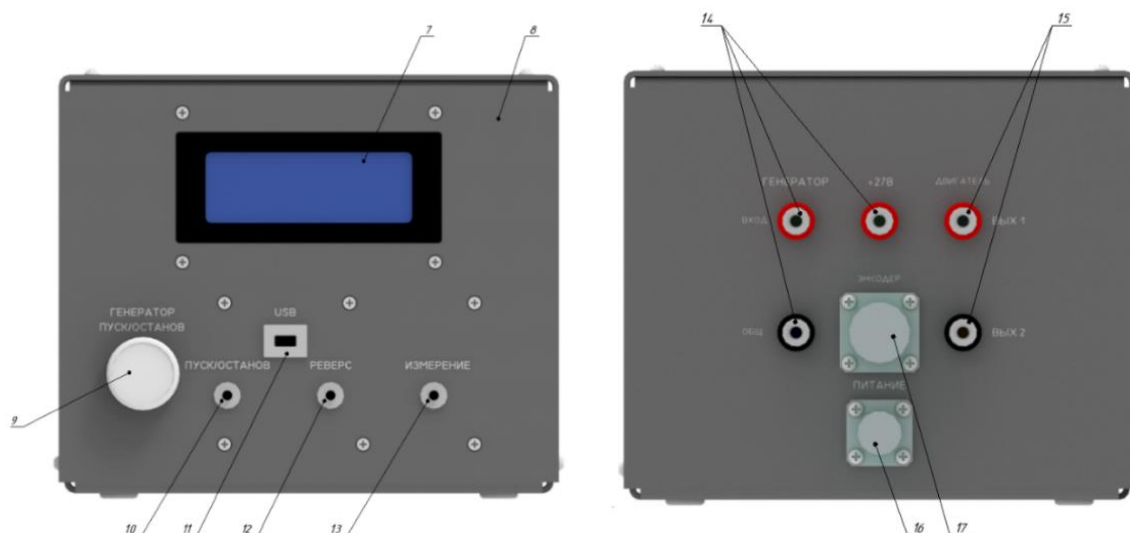


Рисунок 13 – Пульт:

7 – дисплей; 8 – корпус пульта; 9 – механический переключатель; 10 – тактовая кнопка «ПУСК/ОСТАНОВ»; 11 – USB питание; 12 – тактовая кнопка «РЕВЕРС»; 13 – тактовая кнопка «ИЗМЕРЕНИЕ»; 14 – разъемы для подключения генератора/электромагнитного тормоза; 15 – разъемы для подключения электродвигателя; 16 – разъем для подключения источника питания; 17 – разъем для подключения энкодера

Таблица 5 – Результаты сравнительного анализа

	Инженерная методика	Численное моделирование	Инженерная методика (уточненная)	Натурные испытания
Напряжение, В	27			
Частота вращения холостого хода, об/мин	8108	7609	7500	7500
Номинальная частота вращения, об/мин	7497	6653	6674	6650
Пусковой момент, Нм	1,43	1,24	1,43	1,28
Пусковой ток, А	41,5	37,4	41,5	37,5
Номинальный момент, Нм	0,129			
Номинальный ток, А	4,26	4,06	4,1	4,06
Электромеханическая постоянная времени, мс	5	5,1	5	6
Полезная мощность, Вт	101,3	92,77	91,8	90
Потребляемая мощность, Вт	109,5	109,6	110,7	109,6
КПД, %	88	85	83	82
Перегрузочная способность	3	1,9	2,1	-
Удельная мощность, Вт/ кг	155,8	136,4	129,3	126,2

В таблице 6 представлены результаты натурных испытаний электродвигателей с медной и алюминиевой обмоткой.

Таблица 6 – Сравнение параметров электродвигателя с разными обмотками

	Медная обмотка	Алюминиевая обмотка	Относительная разность, %
Номинальное напряжение, В	27		–
Частота вращения холостого хода, об/мин	7500	7900	5,3
Постоянная машины, мНм/А	34,3	32,6	5
Пусковой ток, А	37,5	22	41,3
Пусковой момент, мНм	1,28	0,69	46,1
Номинальная частота вращения, об/мин	6650	6425	3,4
Номинальный момент, мНм	129	74,1	42,6
Номинальный ток, А	4,06	2,4	40,9
Номинальная мощность потребления, Вт	109,6	64,8	40,9
Номинальная полезная мощность на валу, Вт	90	49,85	44,6
КПД, %	82	76,9	6,2
Сопротивление якоря (25 °С), Ом	0,72	1,23	70,8
Электромеханическая постоянная времени, мс	6	4	33,3
Температура обмотки, °С	73	60	17,8

Исходя из таблицы можно сделать следующие выводы по замене медной обмотки на алюминиевую:

- сопротивление обмотки, как и предполагалось, выросло примерно на 70%.
- за счет большого сопротивления пусковые характеристики ограничены практически в 2 раза.
- за счет большого сопротивления наблюдается повышенная просадка по частоте вращения. За счет этого эффективность двигателя снижена на 10%.
- несмотря на повышенное сопротивление и пониженную постоянную машины, за счет низкой плотности алюминия (практически в 3 раза меньше, чем у меди) электромеханическая постоянная времени снизилась примерно на 40%.

Таким образом применение алюминиевого провода в качестве обмотки полого якоря может быть более целесообразным в случае, когда необходимо снизить массу и увеличить быстродействие системы допуская при этом просадку по пусковым характеристикам.

Далее были проведены измерения характеристик электродвигателей с использованием печатной обмотки в качестве полого якоря. Сравнительные результаты приведены в таблице 7.

Полученные значения подтверждают целесообразность использования гибких печатных плат в качестве обмотки полого якоря.

Для проведения испытаний электродвигателя была разработана программа и методики испытаний для возможности использования опытных образцов в конечном изделии.

В таблице 8 представлены результаты испытаний, проведенных по описанной методике.

Таблица 7 – Сравнение параметров электродвигателя с обмоткой из медного провода и печатной обмоткой

Параметр	Значение	
	Обмотка из медного провода	Обмотка на основе ГПП
Частота вращения холостого хода, об/мин	7500	7300
Постоянная машины, В·с/рад	0,032	0,04
Напряжение трогания, В	0,3	0,3
Ток холостого хода, А	0,2	0,4
Номинальная частота вращения, об/мин	6650	6550
Номинальный момент, мНм	129	120
Номинальный ток, А	4,06	3,9
Номинальная мощность потребления, Вт	109,6	108
Номинальная полезная мощность на валу, Вт	90	82
КПД, %	82	76

Таблица 8 – Результаты испытаний

Наименование параметра	Требование к параметру	Значение после длительной непрерывной работы	Значение после воздействия пониженной температуры	Значение после воздействия повышенной температуры
Потребляемый ток, А, не более	10,7	5,6	8,5	5,9
Монтажное смещение датчика угла, не более:				
- оси ГН	12'	5'	5'	5'
- оси ВН	12'	4'	6'	6'
Люфт силового привода, не более:				
- оси ГН	12'	5'	5'	5'
- оси ВН	12'	5'	6'	5'
Скорость вращения, °/с, не менее:				
- по оси ГН	35	62	56	62
- по оси ВН	35	59	52	60
Статическая ошибка, не более:				
- по оси ГН	18'	5'	5'	13'
- по оси ВН	18'	5'	6'	13'
Динамическая ошибка, не более:				
- по оси ГН	50'	23'	24'	23'
- по оси ВН	50'	21'	22'	26'

В результате были проведены испытания изготовленных образцов электродвигателей в конечном изделии при нормальных климатических условиях, а также при воздействии разных факторов, описанных в главе 4. В целом изделие выдержало испытания, что подтверждает возможность применения данных электродвигателей в продукции специального назначения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Проведен анализ применяемых электродвигателей в следящих системах на примере антенных модулей станций спутниковой связи. Рассмотрены конструктивные особенности электродвигателей с пазовым, гладким и полым якорем.

Проанализированы виды и строение обмоток, а также конструкции постоянных магнитов. Установлено, что для выполнения требований, предъявляемых к современным следящим системам, наиболее актуальным направлением является разработка и исследование малоинерционных электродвигателей с полым якорем ввиду их конструктивных особенностей.

Учитывая существующие технологии на территории Российской Федерации по изготовлению электродвигателей с полым якорем, существует необходимость в разработке новых способов изготовления обмоток данных двигателей, для повышения автоматизации производства и обеспечения высоких функциональных и рабочих характеристик.

2. Разработана математическая модель электродвигателя с полым якорем, основанная на известных электромагнитных соотношениях из общей электротехники и адаптированная под особенности конструкции данных электродвигателей, в части определения коэффициента краевого эффекта, который позволяет уточнить классическую методику проектирования электродвигателей с полым якорем. Полученные результаты позволяют провести более точный экспресс-анализ характеристик электродвигателей данного типа.

3. Разработана математическая модель теплового поля электродвигателя с полым якорем, проведено численное моделирование и получены коэффициенты теплоотдачи на разных поверхностях электродвигателя. Полученные результаты позволяют уточнить классическую инженерную методику расчета для определения температуры в обмотке электродвигателя.

4. Разработаны и изготовлены несколько видов конструкций электродвигателя постоянного тока с полым якорем из медной и алюминиевой проволоки, а также с полым якорем на основе гибких печатных плат. Разработана технология изготовления полого якоря на основе гибких печатных плат, позволяющая автоматизировать процесс производства, повысить качество и уменьшить трудоемкость изготовления конечного изделия.

5. Разработан лабораторный стенд для исследования характеристик электродвигателей, с помощью которого проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспресс-расчета по инженерной методике с результатами натуральных экспериментов, в следствии чего подтверждена адекватность разработанных математических моделей.

Разработана методика испытаний электродвигателей. По разработанной методике проведены натурные испытания изготовленных образцов электродвигателей в конечном

изделии, по результатам которых подтверждена возможность использования разработанных электродвигателей в станциях спутниковой связи, работающих в движении.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Данные исследования и уточненную методику можно применить для расчета и разработки линейки малоинерционных электродвигателей, что позволит решить задачу импортозамещения при проектировании современных следящих систем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Солдатов, А.В. Технология изготовления обмоток электродвигателей с полым якорем на основе гибких печатных плат / А.В. Солдатов, С.Н. Афанасьев, М.С. Самсонов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2025. – Т.18, №5. – С. 644–648. (К2)

2. Встовский, С.А. Особенности теплового расчета коллекторных микродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами и полым якорем / С.А. Встовский, А.Н. Пахомов, А.В. Солдатов, С.Н. Афанасьев // Электротехника. – 2025. – №8. – С. 78–81.

3. Солдатов, А.В. Учет краевых эффектов при определении рабочего магнитного потока в микродвигателях с постоянными магнитами с помощью метода конечных элементов / А.В. Солдатов, С.Н. Афанасьев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2025. Т.18, №7. – С. 962–970.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

4. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ №2025615424. Программный комплекс автоматизации расчета бесколлекторных двигателей постоянного тока с постоянными магнитами / Солдатов А.В., Афанасьев С.Н.; заявитель АО «НПП «Радиосвязь»; заявл. 12.02.2025, опубл. 04.03.2025.

Патент на промышленный образец:

5. Патент на промышленный образец №148191. Электродвигатель / Солдатов А.В., Афанасьев С.Н.; заявитель АО «НПП «Радиосвязь»; заявл. 25.02.2025, опубл. 07.07.2025.

В других изданиях:

6. Афанасьев, С.Н. Автоматизированный расчет магнитной цепи в вентильном двигателе постоянного тока малой мощности с постоянными магнитами и полым якорем для электропривода систем спутниковой и тропосферной связи / С.Н. Афанасьев, А.В. Солдатов // материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Системы связи и радионавигации». – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2024. – С. 8-11.

7. Солдатов, А.В. Особенности изготовления печатных обмоток микродвигателей постоянного тока беспазового исполнения с постоянными магнитами / А.В. Солдатов, О.Г. Сухарева, С.Н. Афанасьев // Успехи современной радиоэлектроники. 2025. С. 59–62.

8. Солдатов, А.В. Особенности применения малоинерционного электродвигателя постоянного тока с постоянными магнитами и полым печатным якорем в электроприводах систем спутниковой и тропосферной связи / А.В. Солдатов, С.Н. Афанасьев // материалы IX Всерос. науч.-техн. конф. «Системы связи и радионавигации». – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2025. – С. 127-129.