

УДК 621.313.32

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТОПЛИВНОГО НАСОСА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Исмагилов Ф.Р.¹, Зарембо И.В.², Калий В.А.^{2*}, Вавилов В.Е.^{1**}, Минияров А.Х.^{1***}

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет,
УГАТУ, ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450008, Республика Башкортостан, Россия

² Холдинг «Технодинамика». Уфимское агрегатное производственное объединение,
ул. Аксакова, 97, Уфа, 450076, Республика Башкортостан, Россия

* e-mail: vtipy@mail.ru

** e-mail: s2_88@mail.ru

*** e-mail: miniar-a@ya.ru

Статья посвящена разработке и исследованию вентильного электродвигателя топливных насосов для перспективных летательных аппаратов. Представлены конструкция вентильного электродвигателя и экспериментальные исследования макетного образца при различных режимах работы. Испытания макетного образца проводились под воздействием как высоких, так и низких температур. Он показал свою высокую надежность и энергоэффективность при минимальных массогабаритных показателях. Кроме того, разработанная компьютерная модель показала высокую точность и сходимость с результатами эксперимента. На основе разработанных компьютерных моделей и экспериментальных исследований доказывается работоспособность предложенного электродвигателя.

Ключевые слова: вентильный электродвигатель, постоянные магниты, рабочие характеристики, экспериментальные исследования.

Введение

Электрические двигатели (ЭД) являются одними из основных исполнительных элементов, обеспечивающих функционирование систем летательных аппаратов (ЛА). Традиционно они используются в топливных насосах (ТН), насосах подкачки масла, гидравлических станциях, в системах автоматики, в качестве привода вентиляторов и систем механизации крыла. Разнообразие решаемых ими

задач на борту летательных аппаратов делает их практически одним из основных потребителей электроэнергии.

С развитием концепции «более электрического» самолета и электрифицированного авиационного двигателя количество разнообразных функциональных задач, решаемых ЭД на борту ЛА, значительно увеличивается. При этом увеличивается и потребляемая ими мощность. Так, на ЭД планирует-

ся в перспективе возложить задачи кондиционирования воздуха на борту ЛА (сейчас эти задачи решаются пневматической системой летательного аппарата), задачи управления критическими поверхностями ЛА, рулями высоты, системами механизации крыла, управление системами авиационного двигателя (сейчас эти задачи решаются гидравлической системой) и т.д. То есть ЭД будут определять мощность, необходимую для функционирования ЛА. Ввиду ограниченности электрической мощности первичных источников электроэнергии на борту ЛА особенно остро стоит проблема снижения их энергопотребления за счет повышения энергетической эффективности и повышения коэффициента мощности при сохранении минимальных массогабаритных показателей и высокой надежности [1—5].

Вместе с тем при расширении области использования ЭД на борту ЛА одним из основных их назначений остается решение задач функционирования топливной системы. При этом энергоемкость ЭД, необходимых для функционирования топливной системы, увеличивается в условиях модернизации систем дозаправки ЛА в воздухе, расширения требований к топливным насосам и т.д. В концепции электрифицированного двигателя ФГУП «ЦИАМ» электропривод топливного насоса также является одним из основных узлов, обеспечивающих функционирование всех систем ЛА [4, 6].

В настоящее время в авиационных топливных насосах находят применение несколько типов ЭД: двигатели постоянного тока с щёточно-коллекторным узлом, асинхронные ЭД, индукторные и реактивные ЭД, синхронные ЭД с постоянными магнитами (СДПМ) и прямым пуском, а также бесколлекторные вентильные ЭД с постоянными магнитами (ВДПМ). ЭД с щеточно-коллекторным узлом является одним из основных вариантов ЭД, который применяется на различных типах ТН ЛА. Но из-за низкой надежности и невысокой эффективности данного типа ЭД разработчики авиационных ТН для обеспечения экономической эффективности и рентабельности их изделий отказываются от данного типа электродвигателей. Асинхронные ЭД также широко используются на ряде отечественных топливных насосов (МТ-3000-2С, ЭТМ-105, ЭТМ-106 и т.д.). Достоинствами асинхронных ЭД являются хорошие пусковые характеристики и возможность эксплуатации без системы управления. Недостатками асинхронных ЭД являются низкий КПД и низкий коэффициент мощности, а также значительные массогабаритные показатели. Это сужает использование данного типа ЭД в ТН. Аналогичные проблемы (низкий КПД и высокие мас-

согабаритные показатели) также имеют место в индукторных и реактивных ЭД [5].

Одним из возможных решений указанных проблем является использование СДПМ с прямым пуском. Конструктивно данный тип ЭД представляет собой симбиоз асинхронных ЭД и СДПМ. Подобное совместное использование двух типов ЭД позволяет производить запуск без системы управления и при этом достигать высокой эффективности.

В то же время у СДПМ с прямым пуском более низкий пусковой момент по сравнению с асинхронными ЭД и ВДПМ. Это обусловлено тем, что при пуске имеют место два момента: пусковой асинхронный и тормозящий генераторный момент, создаваемый постоянными магнитами.

За последнее время ВДПМ занял прочное положение в производстве ведущих зарубежных и отечественных электромашиностроительных фирмах («Siemens», «Bosh», «General Electric», «Fanuc», «Ansaldo», «AEG», «TG Drives» ООО «ЧЭАЗ-ЭЛПРИ» и др.). Это связано с тем, что вентильный двигатель с редкоземельными постоянными магнитами находят большой спрос на рынке, благодаря своей энергоэффективности и возможности применения в различных агрегатах [15—18]. То есть основным перспективным вариантом ЭД для использования в авиационных ТН на данный момент является ВДПМ. Разработке ВДПМ для аэрокосмических систем посвящен ряд научных и практических работ [6—15].

В [6] рассматриваются особенности полевого моделирования ВДПМ для систем кондиционирования воздуха ЛА. В [7] описаны общие подходы к разработке ВДПМ для авиакосмического применения. Работы [8, 9] посвящены исследованию магнитных систем ротора ВДПМ. В [10—17] решаются проблемы создания системы управления ВДПМ. При этом особенности проектирования ВДПМ для ТН в литературе не раскрыты. Хотя у данного типа ВДПМ существует ряд отличительных признаков, таких, как условия работы в области низких отрицательных температур, при пониженном напряжении, применение графитовых подшипников и т.д. Все эти особенности не позволяют в полной мере использовать результаты работ [6—12].

Поэтому целью данной работы являются анализ особенностей проектирования ВДПМ для ТН путем разработки и исследования ВДПМ ТН с конкретными геометрическими размерами с учетом реальных условий эксплуатации и оценка перспектив развития ВДПМ ТН.

Объект исследования

В качестве примера рассматривается ВДПМ, предлагаемый для замены применяемых на современных ЛА двигателей постоянного тока с щеточно-коллекторным узлом мощностью 100 Вт и потреблением из системы электроснабжения 220 Вт (коэффициент полезного действия 0,45). Исходные данные исследуемого ВДПМ приведены в табл. 1.

пользования микроконтроллеров, т. е. выход ВДПМ на номинальную частоту вращения обеспечивается без какой-либо обратной связи по частоте. Кроме того, система управления ВДПМ должна быть интегрированной и находиться с ЭД в едином корпусе.

При этом ВДПМ для топливных насосов должны сохранять работоспособность в крайне жест-

Таблица 1

Исходные данные для проектирования ВДПМ

№	Наименование параметра	Номинальные данные
1	Номинальное напряжение постоянного тока, В	От 24 до 29,4
2	Качество электропитания	ГОСТ Р 54073-2010
3	Небаланс напряжений, В	Не более 3
4	Пусковой ток, А	42
5	Номинальный момент, Н·м	0,137
6	Частота вращения ротора, об/мин	7000
7	Потребляемый ток, А	Не более 8,5

Ввиду ограничения габаритных размеров для установки ВДПМ наиболее эффективным решением является реализация ВДПМ с зубцовой обмоткой. Это позволяет значительно уменьшить лобовые вылеты электрической машины. В то же время использование зубцовой обмотки приведет к увеличению потерь на вихревые токи в постоянных магнитах, поэтому в работе уделяется внимание минимизации данных потерь.

Анализ конструктивных схем ВДПМ и соотношения числа пазов на полюс и фазу показал, что наиболее эффективным решением будет использование 4-полюсного ВДПМ с зубцовой обмоткой, расположенной на 6 зубцах. В этом случае обмоточный коэффициент будет составлять 0,866, что является хорошим показателем для зубцовой обмотки (для 2-полюсного ВДПМ обмоточный коэффициент не более 0,5). В данном случае ВДПМ для заданных исходных данных имеет минимальную удельную массу и характеризуется простотой технологического освоения. Подходы к выбору оптимальных схем ЭД изложены авторами в работе [13].

В качестве магнитной системы ротора использовалась магнитная система с полукруглыми постоянными магнитами, сечение вала представляло собой квадрат. Подобный подход позволяет упростить технологический монтаж постоянных магнитов на роторе ВДПМ.

Особенностью ВДПМ ТН, помимо отмеченных выше, является необходимость реализации без ис-

ких температурных условиях (до -60°C). При данных температурах увеличивается вязкость топлива и, соответственно, становится необходимым повышение пускового момента ВДПМ. В то же время при низких температурах снижается напряжение на аккумуляторных батареях, которые являются источниками энергии для ВДПМ. Снижение напряжения на аккумуляторных батареях может достигать до 50% от номинального.

Немаловажным фактором, определяющим габаритные размеры и электромагнитные нагрузки в ВДПМ, является способ охлаждения. ВДПМ ТН может быть выполнен погружным, и топливо может находиться внутри его полости. Это приведет к увеличению его гидравлических потерь, поэтому на данном этапе нами рассматривалась конструктивная схема ВДПМ с жидкостной системой охлаждения, где хладагент проходит по внешней поверхности статора.

Конструктивные особенности ВДПМ

Проектирование ВДПМ осуществлялось с использованием многодисциплинарных алгоритмов, предложенных в работе [14]. При проектировании ВДПМ одновременно учитывались тепловые, электромагнитные и механические процессы, протекающие в электрической машине. Изначально были выполнены аналитические расчёты. В табл. 2 приведены основные геометрические размеры и параметры ВДПМ, полученные в результате многодисциплинарных расчетов.

Таблица 2

Геометрические размеры и параметры ВДПМ

Мощность на валу, Вт	105
Номинальный момент, Н·м	0,14
Частота вращения, об/мин	7000-7200
Напряжение постоянного тока, В	27
Число полюсов	4
Активная длина, мм	65
Внешний диаметр статора, мм	58
Толщина бандажной оболочки ротора, мм	0,5
Полная активная длина ВД с учетом лобовых частей, мм	72
Частота тока, Гц	233,3
ПротивоЭДС, В	22,73
Ток при номинальном режиме работы, А	6,5
Потери в обмотке статора, Вт	8
Потери в стали статора, Вт	15
Коэффициент мощности	0,97
Механические потери, Вт	7
Добавочные потери, Вт	5
Потери в постоянных магнитах, Вт	7
Суммарные потери, Вт	42
Потребляемая мощность ВД, Вт	180
Момент инерции ротора, кг·м ²	$7.26508 \cdot 10^{-5}$
Масса постоянных магнитов, кг	0,23
Масса обмотки, кг	0,165
Масса магнитопровода статора, кг	0,650
Масса железа ротора, кг	0,3
Активная масса, кг	1,35

При расчётах и моделировании ВДПМ использовались следующие материалы:

- электротехническая сталь 2421 с толщиной листа 0,35 мм. В перспективе для минимизации потерь планируется уменьшение толщины листа до 0,18 мм. Это позволит снизить потери в стали в 2,6 раза;

- провод ПНЭТ-имид, диаметр провода 0,8 мм. Провод ПНЭТ-имид был выбран исходя из его температурных свойств (рабочая температура 220 °С) и возможности эксплуатации в керосине;

- магниты ротора— SmCo. Остаточная индукция постоянных магнитов 1,07 Тл, коэрцитивная сила 780 кА/м.

По результатам расчетов была создана двухмерная динамическая компьютерная модель в про-

граммном комплексе Ansys Maxwell, на которой были выполнены отработка всех режимов работы ВДПМ и верификация аналитических результатов. Компьютерное моделирование осуществлялось взаимосвязанной моделью. То есть одновременно выполнялось электромагнитное моделирование с учетом процессов в системе управления.

Результаты компьютерного моделирования процессов в ВДПМ приведены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 представлены распределение магнитной индукции в активных элементах ВДПМ и потери в постоянных магнитах на вихревые токи, наводимые пространственными гармониками обмотки статора. Из анализа рисунка видно, что индукция в магнитопроводе ВДПМ составляет не более 1,54 Тл, усредненное значение магнитной

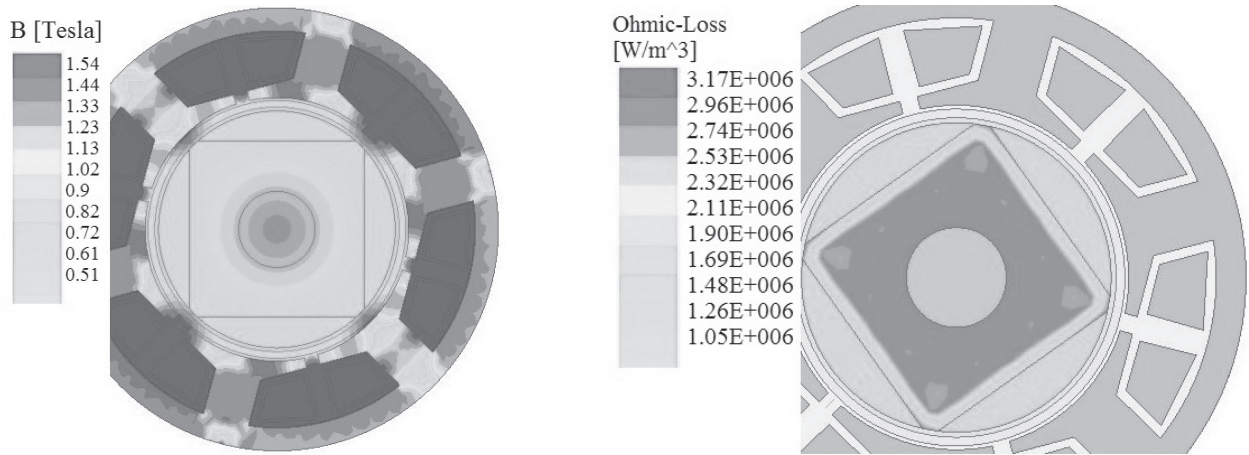


Рис. 1. Распределение магнитной индукции в активных элементах ВД (слева) и потери в постоянных магнитах ротора (справа)

индукции в зубцах 1,38 Тл, что ниже точки насыщения электротехнической стали 2421, потери на вихревые токи в постоянных магнитах по результатам моделирования составили 20—25 Вт. Учитывая габаритные размеры ВДПМ и его мощность, можно заключить, что такие потери в постоянных магнитах являются значительными и могут привести к перегреву постоянных магнитов. Поэтому на стадии расчетов было принято решение выполнять магнитный полюс из 13 магнитов с аксиальной дли-

ной каждого 5 мм. Это позволило уменьшить потери в постоянных магнитах ротора в пять раз.

На рис. 2 приведена динамическая характеристика разгона ВД при номинальном моменте. Из анализа рис. 2 видно, что ВД разгоняется до номинальной частоты вращения ротора за 0,2 с. Значение тока при данной частоте вращения составляет не более 6,5 А. На рис. 3 приведена противоЭДС ВДПМ.

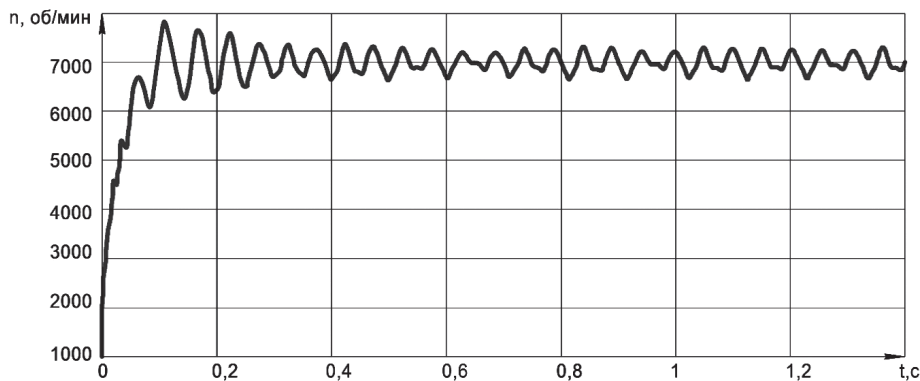


Рис. 2. Характеристика разгона ВДПМ

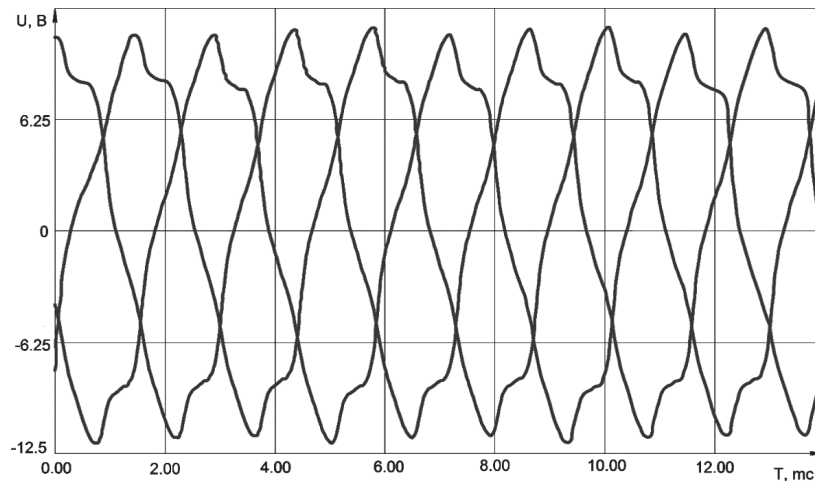


Рис. 3. ПротивоЭДС ВДПМ

Результаты компьютерного моделирования с достаточной точностью подтвердили данные аналитических расчетов, в том числе на динамических режимах работы.

Важным этапом проектирования ВДПМ было обеспечение его работоспособности при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для решения данной задачи были организованы следующие мероприятия:

- в ВДПМ использовались материалы, способные работать при низких температурах, при этом характеристики ВДПМ рассчитывались с учетом перегрузки по механическому моменту;

- в систему управления ВДПМ был дополнительно введен повышающий преобразователь напряжения. Повышающий преобразователь напряжения выполнен на базе микросхемы UC385, работающей на частоте 50 кГц. Преобразователь предназначен для повышения входного напряжения в ВДПМ, которое при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижается. За счет данного преобразователя ВДПМ развивает номинальный момент и требуемую частоту вращения даже при пониженном напряжении. При уровне входного напряжения выше номинального (27 В) преобразователь автоматически отключается.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования позволили с достаточной точностью подтвердить данные аналитических расчетов (расхождение не более чем 3 %). Поэтому следующим этапом исследований было создание экспериментального макета ВДПМ и оценка его характеристик.

Экспериментальные исследования

Для верификации изложенных результатов был создан экспериментальный макет ВДПМ для топливного насоса. На рис. 4 представлены ротор и статор с обмоткой экспериментального макета ВДПМ. Ротор выполнен шихтованным, т. е. полюс состоит из нескольких магнитов, между постоянными магнитами расположена полиамидная пленка толщиной 0,1 мм. Данная конструкция позволяет снизить потери на вихревые токи, что минимизирует нагрев магнитов.

Статор выполнен из электротехнической стали марки 2421. В пазах статора уложена зубцовая обмотка, схема соединения обмотки — звезда, коэффициент заполнения паза составил 62%. Для оценки магнитной индукции в зубцах статора и верификации используемых компьютерных моделей на

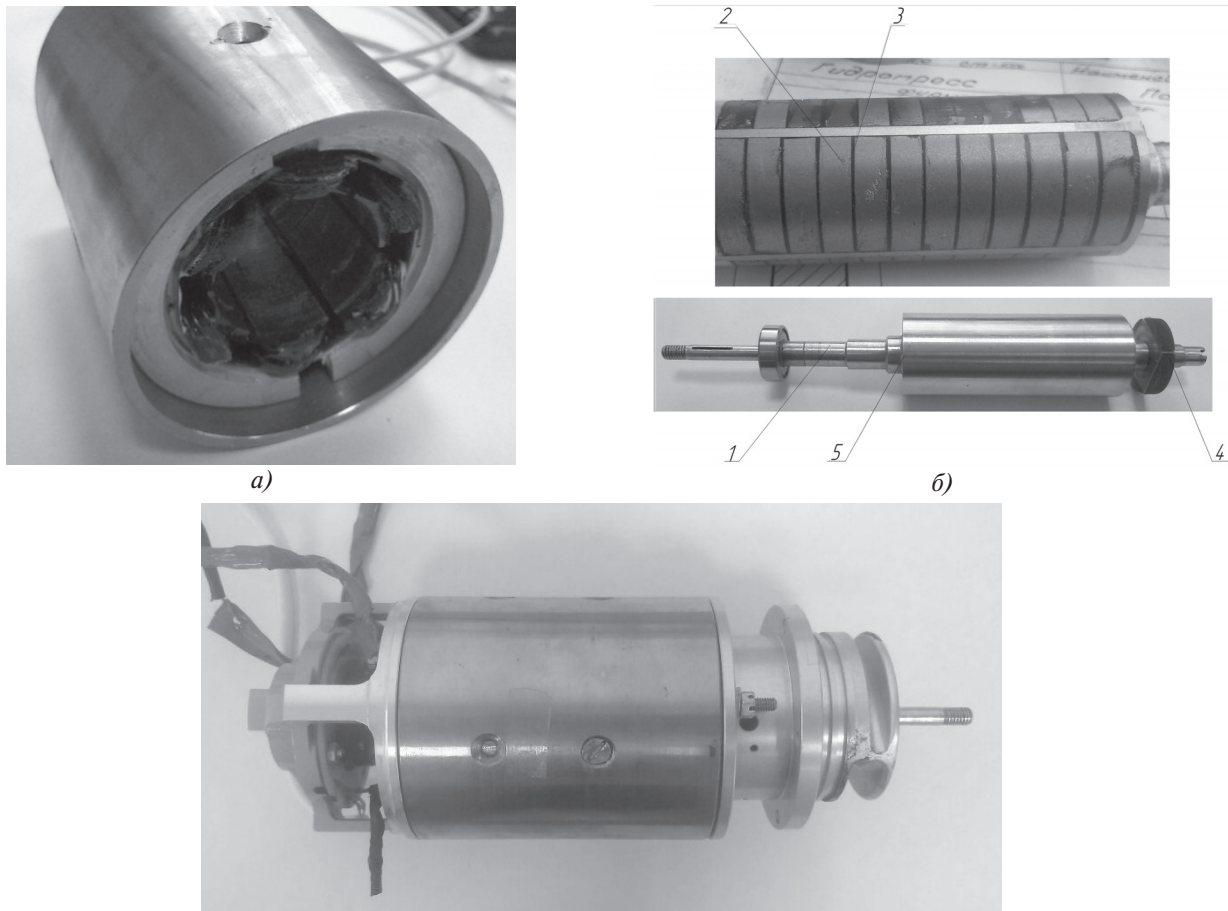


Рис. 4. Обмотанный статор ВД (а) и активные части ВД (б): 1 — вал; 2 — постоянные магниты; 3 — изолирующая пластинка; 4 — магниты для датчиков Холла; 5 — бандаж из немагнитного материала

зубец статора была намотана измерительная обмотка, концы подключены к милливексметру. Результатом измерения установлено, что индукция в зубцах составляет 1,32 Тл. Эти данные согласуются с данными компьютерного моделирования (см. рис. 1) и подтверждают адекватность компьютерной модели.

Основная задача при исследовании экспериментального макета заключалась в оценке сходимости данных эксперимента с данными компьютерного моделирования и проверка работоспособности ВДПМ в экстремальных условиях. Макетный образец испытывался в критических условиях при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также проводилось испытания пуска двигателя при низком напряжении для имитации аварийной работы ВДПМ.

Испытания макета выполнялись на специальном стенде. Стенд включает в себя испытуемый ВДПМ, электромагнитный тормоз, регулируемый источник постоянного тока, пирометр, вольтметр, амперметр и тахометр. При отрицательных температурах охлаждение ВДПМ и системы управления отсутствовало.

Испытания приводились под нагрузкой. За 15 мин эксплуатации температура обмотки статора изменилась с 25 до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура полупроводниковых ключей составила $45\text{--}47\text{ }^{\circ}\text{C}$. При проведении испытания ВДПМ охлаждение не использовалось. Измерение температуры силовой электроники производилось пирометром, измерение температуры магнитопровода статора поверхностей — термометром. При нагрузке частота вращения ротора составила от 8300 об/мин до 7200 об/мин (частота вращения ВДПМ регулировалась), потребляемый ток составил 6,5 А, напряжение 27 В с номинальным моментом 0,14 Н·м. Потери в ВДПМ, определенные по результатам экспериментальных исследований, составляют $45\text{--}47\text{ Вт}$. То есть расхож-

дение с данными компьютерного моделирования составило 2—4 %. Аналогичная погрешность имеет место при полученных значениях тока, напряжения и частоты вращения ротора.

При экспериментальных исследованиях имитировался аварийный запуск двигателя при низком напряжении 18 В. Частота вращения ротора при аварийной работе составила 4200 об/мин, потребляемый ток 5 А с моментом на валу 0,12 Н·м. По полученным данным в ходе проведенных экспериментальных исследований построена механическая характеристика экспериментального макета ВДПМ (рис. 5).

Важным аспектом при экспериментальных исследованиях являлась оценка состояния ВДПМ при изменении температуры его активных частей. Для проведения данных исследования ВДПМ выдерживался в течение двух часов в климатической камере при температурах от 60 до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. По результатам данных экспериментальных исследований были получены характеристики ВДПМ, показывающие изменение его КПД и частоты вращения в зависимости от температуры. Характеристики приведены на рис. 6 и 7.

Из рис. 6 и 7 видно, что при увеличении температуры активных элементов ВДПМ его КПД уменьшается на 10 %, а частота вращения в предельных точках снижается до 6400 об/мин. Это обусловлено снижением характеристик постоянных магнитов под действием температуры и увеличением активного сопротивления. Для решения данной проблемы в ВДПМ с обратной связью используется регулятор с учетом температуры активных элементов. В ВДПМ без обратной связи ввиду невозможности введения данного регулятора, необходимо обеспечивать максимальный отвод тепла с активных частей во избежание снижения частоты вращения и сохранения ее на постоянном уровне.

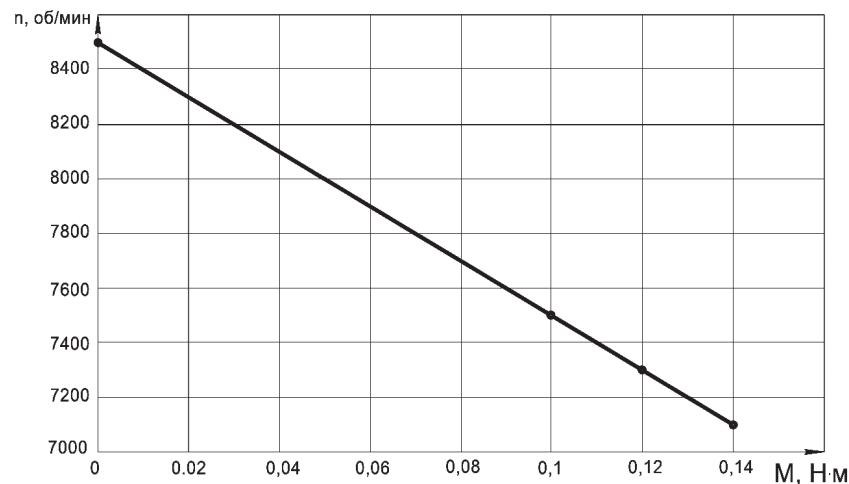


Рис. 5. Механическая характеристика ВДПМ

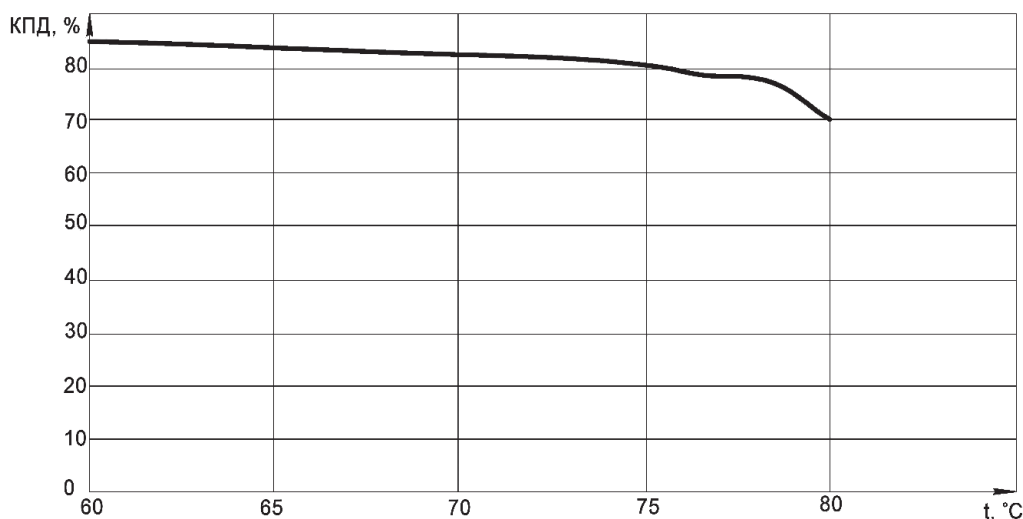


Рис. 6. Зависимость КПД ВДПМ от температуры активных элементов

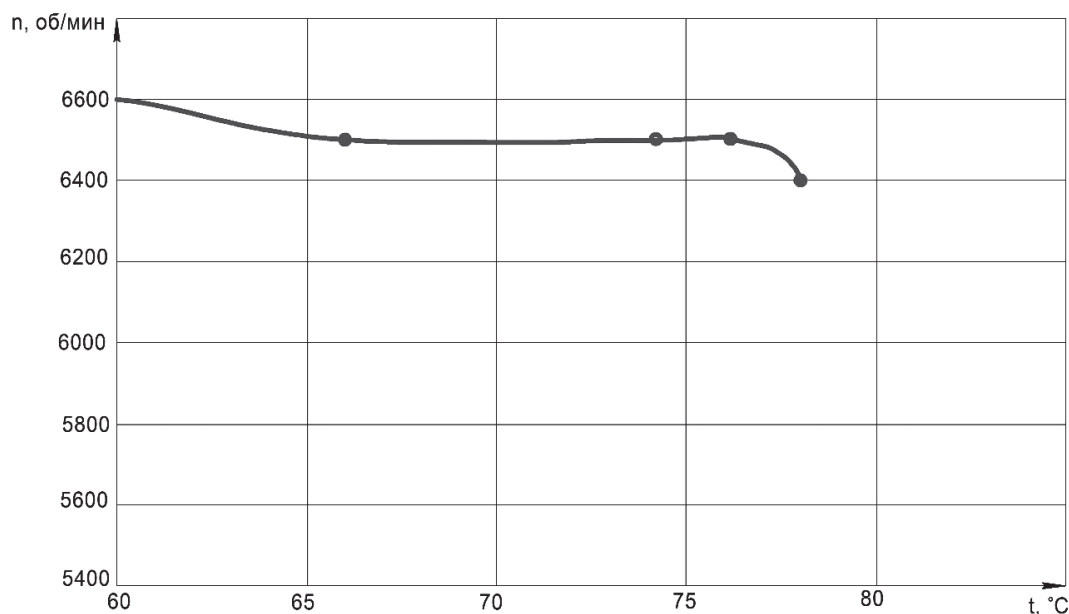


Рис. 7. Зависимость частоты вращения ротора ВДПМ от температуры активных элементов

Также проводились исследования экспериментального макета при отрицательных температурах: -30 и -60 °С. Перед проведением данных исследований радиальный подшипник ВДПМ заменили графитовым и установили резиновые манжеты и уплотнители. Это позволило имитировать работу ВДПМ в реальном ТН. В результате исследований была показана полная работоспособность ВДПМ, а также доказана возможность эксплуатации ВДПМ без повышающего преобразователя, что значительно упрощает систему управления ВДПМ.

Выводы

Результаты экспериментальных исследований отличаются от данных компьютерного моделирования не более чем на 4 %, что является хорошим показателем. Кроме того, исследуемый ВДПМ вы-

держал проверку при экстремальных условиях, что подтвердило правильность принятых на стадии проектирования решений.

В целом необходимо отметить, что созданный экспериментальный макет ВДПМ позволил на 45—50 % уменьшить массу по сравнению с используемым в ТН ЭД постоянного тока с щеточно-коллекторным узлом, а также снизить энергопотребление с 220 до 180 Вт.

Библиографический список

1. *Borisavljevic A., Polinder H., Ferreira J.A.* On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. № 1, pp. 220-227. DOI: 10.1109/TIE.2009.2030762
2. *Zhao Xin, Guerrero J.M., Wu Xiaohua.* Review of aircraft electric power systems and architectures // IEEE International Energy Conference (ENERGYCON),

- 2014, pp. 949-953. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850540
3. Jones R.I. The More Electric Aircraft: the past and the future? // *Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft*. 1999, pp. 1/1-1/4. DOI: 10.1049/ic:19990830
 4. Гуревич О.С., Белкин Ю.С., Трофимов А.С., Чернышов В.И. Демонстрационная система управления и топливопитания газотурбинного двигателя на базе электрических приводов // *Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями*. Труды ЦИАМ. №1346. М.: Торус Пресс, 2010. С. 30-38.
 5. Грузков С.А., Останин С.Ю., Сугробов А.М., Токарев А.Б., Тыричев П.А. Электрооборудование летательных аппаратов: Учебник для вузов. — М.: МЭИ, 2005. Т. 2 — 564 с.
 6. Волокитина Е.В., Власов А.И., Опалев Ю.Г. Применение полевых математических моделей для проектирования обмоток вентильных электродвигателей // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2013. № 3. С. 12-15.
 7. Геращенко А.Н., Куликов Н.И., Куприянов А.Д., Сорокин А.Е., Старовойтова Н.П. Применение компьютерных технологий при проектировании специализированных вентильных двигателей // *БИОТЕХНОСФЕРА*. 2011. № 4(16). С. 38-45.
 8. Ситин Д.А. Магнитные системы синхронных электрических машин с редкоземельными постоянными магнитами и повышенной частотой вращения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — М., 2009. — 26 с.
 9. Власов А.И., Волокитина Е.В., Малюгин А.А., Опалев Ю.Г. Исследование магнитной системы высокоскоростных бесконтактных электродвигателей постоянного тока // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2013. № 3. С. 23-26.
 10. Воронин С.Г., Курносоев Д.А., Кульмухаметова А.С. Векторное управление синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов // *Электротехника*. 2013. № 10. С. 50-54.
 11. Воронин С.Г., Курносоев Д.А., Коробатов Д.В., Шабуров П.О., Кульмухаметова А.С. Электромагнитный момент и момент сопротивления на валу синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов // *Электротехника*. 2012. № 2. С. 2-5.
 12. Геращенко А.Н., Куликов Н.И., Сорокин А.Е., Старовойтова Н.П. Вентильные двигатели с зубцовым и гладким якорем для высокоточного электропривода // *Вестник Московского авиационного института*. 2009. Т. 16. № 5. С. 73-77.
 13. Yakupov A., Ismagilov F., Khayrullin I., Vavilov V. Method of designing high-speed generators for the biogas plant // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2016. No 6(2), pp. 447-454.
 14. Uzhegov N., Kurvinen E., Nerg J., Pyrhonen J., Sopanen J.T., Shirinskii S. Multidisciplinary Design Process of a 6-Slot 2-Pole High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Machine // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014. Vol. 63. No. 2, pp. 784-795. DOI: 10.1109/TIE.2015.2477797
 15. Волокитина Е.В., Власов А.И., Опалев Ю.Г. Новые моментные вентильные электродвигатели для прецизионных электроприводов технологических роботов и металлообрабатывающего оборудования // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2011. № 4. С. 32-35.
 16. Ишутинов В.В. Применение методов оптимизации при проектировании вентильных электродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами для специальных приводов // *Электротехника*. 2014. № 4. С. 46-50.
 17. Горшков Р.Г. Разработка и исследование вентильного двигателя с постоянными магнитами на основе математического моделирования магнитного поля: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Самара, 2011. — 22 с.
 18. Афанасьев А.А., Нестерин В.А., Никифоров В.Е., Бабак А.Г., Головизнин С.Б., Волокитина Е.В., Николаев А.В., Чихняев В.А. Высокоскоростной малоинерционный вентильный двигатель с постоянными магнитами // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2004. № 6. С. 8-13.
 19. Ишутинов В.В. Требования, предъявляемые к вентильным электродвигателям в авиационных и специальных приводах // *Всероссийская ежегодная научно-техническая конференция «Общество, наука, инновации» (НТК-2012): Сборник трудов конференции*. Киров: Вятский государственный университет, 2012. С. 2060-2061.
 20. Бабак А.Г., Польков И.А. Бесконтактные вентильные электродвигатели исполнительных механизмов для современных автомобилей // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2004. № 3-4. С. 12-14.

SPECIFICS OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DEVELOPMENT FOR FUEL PUMP OF PERSPECTIVE FLYING VEHICLES

Ismagilov F.R.¹, Zarembo I.V.², Kalii V.A.^{2*}, Vavilov V.E.^{1**}, Miniyarov A.Kh.^{1***}

¹ Ufa State Aviation Technical University,
USATU, 12, K. Marx str., Ufa, 450008, Republic of Bashkortostan, Russia

² Holding Tehnodinamika UAPO,
97, Aksakova str., Ufa, 450095, Republic of Bashkortostan, Russia

* e-mail: vtipy@mail.ru

** e-mail: s2_88@mail.ru

*** e-mail: miniar-a@ya.ru

Abstract

Electric motors are one of the main actuating element ensuring aircraft systems functioning. Traditionally, they are employed in fuel pumps, oil pumping pumps, hydraulic stations, automation systems, as fans drive, and wing-flap systems. The variety of problems solved by electric motors on board the aircraft, makes them almost one of the main consumers of electric power.

Currently, several types of electric motors are employed in aircraft fuel pumps, such as DC motors with brush-collector unit, induction motors, inductor and reactive motors, permanent magnet synchronous motors (PMSM) with direct start, and brushless direct current motors (BLDCM). All the listed motors have problems related to energy efficiency and mass and size indicators.

Thus, the main promising motor version for employing in aviation fuel pumps at this stage is the PMSM. A number of scientific and practical works are devoted to the development of the PMSM for aerospace systems. In particular, the specifics of field simulation of the PMSM for aircraft air-conditioning systems and general approaches to PMSM development for aerospace applications are considered. The works are devoted to the study of the PMSM magnetic systems and solving the problems of creating a PMSM control system development. The design features herewith of PMSM for fuel pumps are not disclosed in the literature. Although this type of motors has a number of distinctive features, such as working conditions in the field of low negative temperatures, working capacity at low voltage, employing of graphite bearings, etc. All these specifics do not allow employ the results of the works to the full extent.

Thus, the purpose of this article consists in analyzing the design features of the PMSM for fuel pump by developing and examining the PMSM for fuel pump with concrete geometry with account for real operating conditions and evaluating the prospects for the development of the PMSM for fuel pump.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, permanent magnets, operating characteristics, experimental studies.

References

1. Borisavljevic A., Polinder H., Ferreira J.A. On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 1, pp. 220–227. DOI: 10.1109/TIE.2009.2030762
2. Zhao Xin, Guerrero J.M., Wu Xiaohua. Review of aircraft electric power systems and architectures. *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 2014, pp. 949–953. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850540
3. Jones R.I. The More Electric Aircraft: the past and the future? *Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft*, 1999, pp. 1/1-1/4. DOI: 10.1049/ic:19990830
4. Gurevich O.S., Belkin Yu.S., Trofimov A.S., Chernyshov V.I. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigatelyami. Trudy TsIAM №1346. Sbornik statei*, Moscow, Torus Press, 2010, pp. 30-38.
5. Gruzkov S.A., Ostanin S.Yu., Sugrobov A.M., Tokarev A.B., Tyrichev P.A. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov* (Electrical equipment of aircraft), Moscow, MEI, 2005, vol. 2, 564 p.
6. Volokitina E.V., Vlasov A.I., Opalev Yu.G. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2013, no. 3, pp. 12-15.
7. Gerashchenko A.N., Kulikov N.I., Kupriyanov A.D., Sorokin A.E., Starovoitova N.P. *BIOTEKHNOLOGIYA*, 2011, no. 4(16), pp. 38-45.
8. Sitin D.A. *Magnitnye sistemy sinkhronnykh elektricheskikh mashin s redkozemel'nymi postoyannymi magnitami i povyshennoi chastotoi vrashcheniya* (Magnetic systems of synchronous electric machines with rare-earth permanent magnets and increased rotation frequency). The abstract. Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2009, 26 p.
9. Vlasov A.I., Volokitina E.V., Malyugin A.A., Opalev Yu.G. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2013, no. 3, pp. 23-26.

10. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kul'mukhametova A.S. *Elektrotehnika*, 2013, no. 10, pp. 50–54.
11. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Korobotov D.V., Shaburov P.O., Kul'mukhametova A.S. *Elektrotehnika*, 2012, no. 2, pp. 2–5.
12. Gerashchenko A.N., Kulikov N.I., Sorokin A.E., Starovoitova N.P. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 73-77.
13. Yakupov A., Ismagilov F., Khayrullin I., Vavilov V. Method of designing high-speed generators for the biogas plant. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2016, no. 6(2), pp. 447-454.
14. Uzhegov N., Kurvinen E., Nerg J., Pyyhonen J., Sopanen J.T., Shirinskii S. Multidisciplinary Design Process of a 6-Slot 2-Pole High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 63, no. 2, pp. 784-795. DOI: 10.1109/TIE.2015.2477797
15. Volokitina E.V., Vlasov A.I., Opalev Yu.G. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2011, no. 4, pp. 32-35.
16. Ishutinov V.V. *Elektrotehnika*, 2014, no. 4, pp. 46–50.
17. Gorshkov R.G. *Razrabotka i issledovanie ventil'nogo dvigatelya s postoyannymi magnitami na osnove matematicheskogo modelirovaniya magnitnogo polya* (Development and research of brushless DC permanent magnet motor based on mathematical modeling of magnetic field). The abstract. Doctor's thesis, Samara, Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011, 22 p.
18. Afanas'ev A.A., Nesterin V.A., Nikiforov V.E., Babak A.G., Goloviznin S.B., Volokitina E.V., Nikolaev A.V., Chikhnyaev V.A. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2004, no. 6, pp. 8-13.
19. Ishutinov V.V. *Vserossiiskaya ezhegodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Obshchestvo, nauka, innovatsii" (NTK-2012). Sbornik trudov*. Kirov, Vyatskii gosudarstvennyi universitet, 2012, pp. 2060-2061.
20. Babak A.G., Pol'kov I.A. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2004, no. 3-4, pp. 12-14.