



Передовая инженерная школа
Моторы Будущего

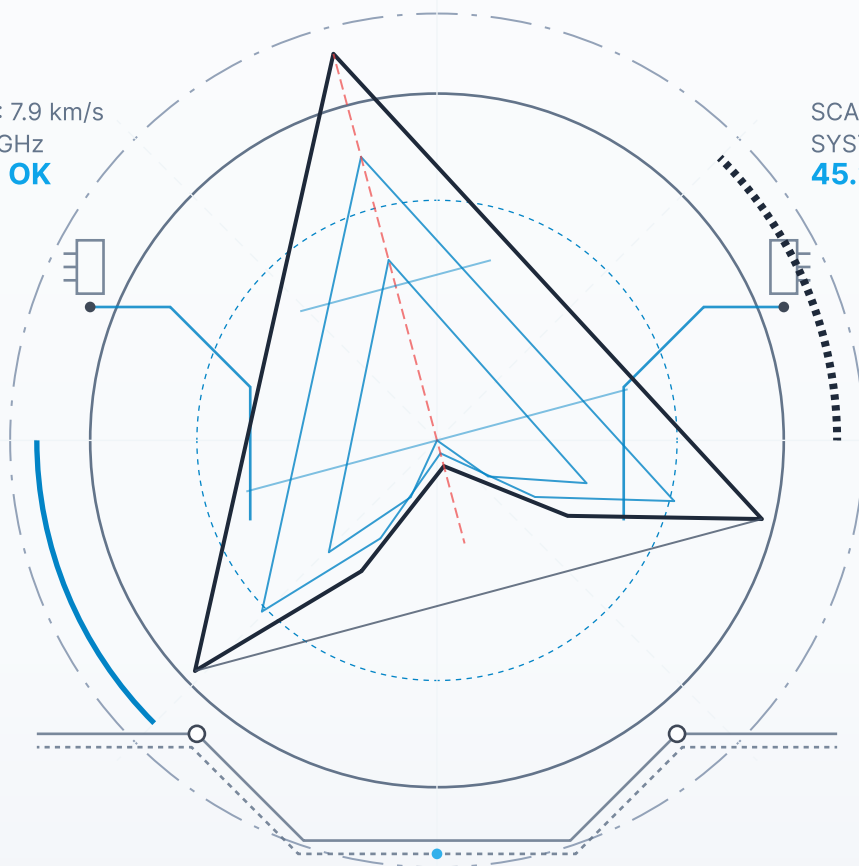


УФИМСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

приоритет2030⁺
лидерами становятся

VECTOR_V: 7.9 km/s
FREQ: 2.4 GHz
STATUS: OK

SCALE: 1:0.45
SYSTEM: ACTIVE
45.28° N



01 // Космические технологии и связь

02 // Электромеханические системы и их применение

03 // Инновационные материалы и производственные технологии

РАЗВИТИЕ ПОТЕНЦИАЛА МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ И ПАМЯТЬ О ДОСТИЖЕНИЯХ ПРОШЛЫХ ЛЕТ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИИ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. АВИАЦИЯ И КОСМОС

2026 | •

УФА

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. АВИАЦИЯ И КОСМОС – 2026

*Материалы
Региональной научно-практической конференции
«Электротехника. Авиация и космос – 2026»
(г. Уфа, 10 апреля 2026 г.)*

Научное электронное издание сетевого доступа

Уфа
Уфимский университет
2026

УДК 621.3+629.7
ББК 31.2+39.52+39.62
Э45

*Публикуется по решению кафедры электромеханики
ПИШ «Моторы будущего» УУНиТ.
Протокол № 24 от 13.05.2026 г.*

Редакционная коллегия:

канд. техн. наук, доцент кафедры, и. о. заведующего кафедрой электромеханики,
директор ПИШ «Моторы будущего»

М. В. Охотников (*отв. редактор*);

д-р техн. наук, профессор кафедры электромеханики

Ф. Р. Исмагилов;

начальник технологического отдела ПИШ «Моторы
будущего», ассистент кафедры электромеханики

А. И. Шайхлисламов;

инженер-конструктор расчетно-конструкторского отдела ПИШ «Моторы
будущего», ассистент кафедры электромеханики

М. В. Иванов;

инженер расчетно-конструкторского отдела ПИШ «Моторы будущего»,
ассистент кафедры электромеханики

Д. В. Кобзов

Э45 **Электротехника. Авиация и космос – 2026:** материалы Региональной научно-практической конференции «Электротехника. Авиация и космос – 2026» (г. Уфа, 10 апреля 2026 г.) / отв. ред. М. В. Охотников [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2026. – 78 с. – URL: <https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2026/094.pdf> – Загл. с титула экрана.
ISBN 978-5-7477-6382-1

В сборнике представлены научные статьи, посвящённые современным исследованиям и разработкам на стыке электротехники, авиации и космонавтики.

Предназначен для специалистов авиационно-космической отрасли, исследователей в области электротехники и энергетики, а также студентов и аспирантов соответствующих направлений подготовки.

УДК 621.3+629.7
ББК 31.2+39.52+39.62

ISBN 978-5-7477-6382-1

© Уфимский университет, 2026

Содержание

СТАТЬИ

1. Перспективы беспроводной передачи энергии для питания спутниковых группировок 4
2. Лазерная связь между спутниками: преимущества и проблемы..... 8
3. Обзор методов диагностики дефектов постоянных магнитов в синхронных электрических машинах..... 12
4. Сравнительный анализ коллеторных и бесколлекторных электродвигателей для применения в беспилотных летательных аппаратах 16
5. Сравнительный анализ поведения СДПМ при обрыве фазы при использовании одного и двух инверторов 19
6. Современные тенденции в проектировании отказоустойчивых модульных электрических машин 24
7. Межзвездный космический корабль нового типа..... 30
8. Внедрение композитных материалов в конструкцию МС-21: опыт и технологические вызовы 32
9. Использование аддитивных технологий (3D-печать) при создании ракетных двигателей замкнутой схемы 34

ПРОЕКТЫ

1. Технологии изготовления роторов с постоянными магнитами для электрических машин 38
 2. Система охлаждения электрических машин в авиации 49
 3. Аддитивные технологии в изготовлении элементов электрических машин..... 68
- Список участников, представивших материалы без участия в конкурсном отборе. 77

СТАТЬИ

УДК 629.78:621.331

Перспективы беспроводной передачи энергии для питания спутниковых группировок

Ахмадиев А.Р., Ахметгалеев Э.А.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация: в статье рассматриваются технологии беспроводной передачи энергии (БПЭ) как перспективное решение для энергоснабжения спутниковых группировок, особенно в условиях ограниченной работы солнечных батарей (теневые участки орбиты, полярные регионы, лунная ночь). Проведён сравнительный анализ микроволнового и лазерного методов передачи энергии, оценены их эффективность, технические требования и области применения. На основе моделирования лунной орбитальной группировки показано, что использование 10 спутников-ретрансляторов в полярной орбите способно обеспечить до 18,9 кВт полезной мощности на приёмной стороне при угле передачи 80°. Сделан вывод о целесообразности гибридных систем БПЭ для повышения надёжности и автономности космических аппаратов нового поколения.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, спутниковая группировка, микроволновое излучение, лазерная передача, космическая энергетика, лунная орбита, технология SPS.

1. Введение

Современные космические миссии предъявляют всё более высокие требования к энергообеспечению бортовых систем. Традиционные источники – солнечные батареи и химические аккумуляторы – имеют ряд ограничений: снижение эффективности в тени, деградация элементов, ограниченная ёмкость. В условиях длительных теневых участков орбиты (до 45 минут для НОО) или при работе в полярных регионах Луны (ночь до 14 земных суток) возникает критическая потребность в альтернативных способах подзарядки.

Беспроводная передача энергии (Wireless Power Transmission, WPT) рассматривается как одно из наиболее перспективных решений данной проблемы. Технология позволяет передавать энергию от спутника-источника к спутнику-потребителю без физического контакта, что особенно актуально для распределённых группировок, межспутниковой связи и обеспечения лунных/марсианских миссий.

Цель работы – проанализировать современные технологии БПЭ, оценить их применимость для питания спутниковых группировок и предложить рекомендации по выбору архитектуры системы.

2. Технологии беспроводной передачи энергии: сравнительный анализ

На сегодняшний день два основных метода БПЭ рассматриваются для космического применения: микроволновая передача (Microwave Power Transmission, MPT) и лазерная передача (Laser Power Transmission, LPT).

2.1. Микроволновая передача (частоты 2,45 ГГц / 5,8 ГГц)

Принцип действия: Генерация СВЧ-излучения, формирование узконаправленного луча с помощью фазированной антенной решётки, приём энергии ректенной (выпрямляющей антенной) и преобразование в постоянный ток.

Преимущества:

Высокий КПД преобразования: до 85–90% на этапе генерации и до 70–80% на приёме (суммарный КПД системы ~50–65%) [1].

Слабое затухание в атмосфере и при прохождении через облака, дождь.

Отработанная элементная база (магнетроны, твердотельные усилители).

Безопасность для биологических объектов при соблюдении норм плотности мощности (<1 мВт/см²).

Недостатки:

Большие размеры передающей и приёмной антенн (диаметр передающей антенны для геостационарной орбиты – несколько километров).

Низкая плотность мощности на больших расстояниях.

Необходимость высокоточной системы наведения луча (ошибка $<0,1^\circ$).

Применение: Передача энергии с геостационарной орбиты на Землю (проекты SPS), межспутниковая передача в пределах одной группировки.

2.2. Лазерная передача (длина волны 800–1100 нм)

Принцип действия: Генерация когерентного лазерного излучения, передача узким лучом, приём фотоэлектрическим преобразователем (специализированные фотоэлементы на основе GaAs, InGaAs).

Преимущества:

Высокая направленность луча (расходимость <10 мкрад), что позволяет передавать энергию на большие расстояния с малыми потерями.

Компактные размеры оптической системы по сравнению с СВЧ-антеннами.

Возможность быстрой модуляции сигнала для одновременной передачи данных и энергии.

Недостатки:

Сильное затухание в атмосфере (требует размещения приёмника в космосе или на высоте).

Чувствительность к наведению: требуется система точного удержания луча (погрешность <1 мкрад).

Тепловые нагрузки на приёмный элемент, необходимость активного охлаждения.

КПД системы: 30–50% (включая преобразование электричество→лазер→электричество).

Применение: Питание малых КА, БПЛА, лунных роверов, межспутниковая связь в глубоком космосе.

2.3. Сводная таблица сравнения

Параметр	Микроволновая передача	Лазерная передача
Частота / длина волны	2,45 / 5,8 ГГц	808 / 1064 нм
КПД системы	50–65%	30-50%
Размер передающей антенны/оптики	Большой (м–км)	Компактный (см–дм)
Влияние атмосферы	Слабое	Сильное
Точность наведения	0,1°	<0,001°
Безопасность	Высокая (при нормировании)	Требуется защиты глаз/датчиков
Технологическая готовность (TRL)	6-7	4-5

3. Моделирование энергоснабжения спутниковой группировки на примере лунной орбиты

В работе [2] представлено моделирование системы БПЭ для лунной орбитальной группировки. Рассмотрены три сценария орбит:

Круговая полярная лунная орбита (высота ~100 км).

Низкая эллиптическая «замороженная» орбита (апоцентр 1838 км, эксцентриситет 0,01).

Далекая ретроградная орбита (DRO) системы Земля–Луна.

Результаты расчётов (для 10 спутников-источников, мощность передатчика 1 кВт на спутник):

Тип орбиты	Угол передачи α_{max}	Полезная мощность на приёмнике, кВт
Круговая полярная	50°	8,78
Круговая полярная	80°	18,92
Эллиптическая замороженная	50°	2,11
Эллиптическая замороженная	80°	6,46
Далекая ретроградная (DRO)	50°	10,56
Далекая ретроградная (DRO)	80°	21,61

Вывод: Максимальная эффективность достигается при использовании далёких ретроградных орбит и увеличении угла обзора приёмника. Однако такие орбиты требуют более сложных систем навигации и управления.

Практическая значимость: Даже при консервативных оценках ($\alpha_{max} = 60^\circ$, 3 спутника) система способна обеспечить 3-4 кВт дополнительной мощности,

что достаточно для подзарядки аккумуляторов малого КА или питания научной аппаратуры в теневой фазе.

4. Технические вызовы и пути их решения

Несмотря на перспективность, внедрение БПЭ в космические системы сталкивается с рядом проблем:

Точность наведения луча. Решение: использование систем кооперативного наведения с обратной связью, лазерных дальномеров и гироскопических стабилизаторов.

Теплоотвод. Высокомощные лазеры и СВЧ-генераторы выделяют значительное тепло. Решение: применение радиаторов с высокой излучательной способностью, тепловых труб.

Электромагнитная совместимость. СВЧ-излучение может создавать помехи бортовой электронике. Решение: экранирование, частотное планирование, использование защищённых диапазонов.

Безопасность. Необходимость исключения попадания луча на сторонние объекты. Решение: системы автоматического отключения при потере сигнала подтверждения от приёмника.

5. Заключение и перспективы

Беспроводная передача энергии представляет собой технологический прорыв для обеспечения автономности спутниковых группировок. На основе проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

Для межспутниковой передачи в пределах одной группировки (расстояния до 10 000 км) наиболее целесообразно использование лазерных систем благодаря их компактности и высокой направленности.

Для передачи энергии с геостационарной орбиты на КА в НОО или на лунную поверхность предпочтительнее микроволновые системы из-за меньшего влияния атмосферы и более высокой технологической готовности.

Оптимальным решением является гибридная архитектура, сочетающая оба метода: лазер – для точечной быстрой подзарядки, СВЧ – для фонового энергоснабжения.

Внедрение БПЭ позволит увеличить срок активного существования КА, снизить массу бортовых аккумуляторов и повысить надёжность миссий в экстремальных условиях.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение КПД преобразователей, разработку адаптивных систем наведения и проведение натурных экспериментов на МКС или лунных миссиях.

Библиографический список

1. Sasaki S., Tanaka K. Wireless power transmission technologies for solar power satellite // 2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series. – IEEE, 2011. – DOI: 10.1109/IMWS.2011.5877137.
2. Lopez F., Mauro A., Mauro S. et al. A Lunar-Orbiting Satellite Constellation for Wireless Energy Supply // Aerospace. – 2023. – Vol. 10, № 11. – P. 919. – DOI: 10.3390/aerospace10110919.

3. Kharlan A.A., Biktimirov S.N., Ivanov A.B. Prospects for the Development of Global Satellite Communication Constellations // Cosmic Research. – 2020. – Vol. 58. – P. 402–410.
4. Strassner B., Chang K. Microwave Power Transmission: Historical Milestones and System Components // Proceedings of the IEEE. – 2013. – Vol. 101, № 6. – P. 1379–1396.
5. Juraev D. Inter-satellite optical wireless communication (Is-OWC): trends, a review, challenges and opportunities // ResearchGate. – 2024.
6. Bassegy K. Space-based solar power: Unlocking continuous renewable energy through wireless transmission from

УДК 629.783

Лазерная связь между спутниками: преимущества и проблемы

Ахметгалеев Э.А., Ахмадиев А.Р.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация: в статье рассматривается технология оптической межспутниковой связи (ISL) как ключевой элемент архитектуры современных низкоорбитальных и геостационарных группировок. Проведён сравнительный анализ лазерных и радиочастотных каналов передачи данных, выявлены основные преимущества: экстремально высокая пропускная способность, компактность терминалов, устойчивость к радиопомехам и отсутствие необходимости лицензирования частот. Одновременно проанализированы технические ограничения: требования к сверхточному наведению и удержанию луча, чувствительность к микровибрациям платформы, сложность термостабилизации оптических компонентов и фрагментированность протоколов. На основе расчётных оценок бюджетной линии связи показана достижимость скоростей 10–100 Гбит/с для орбитальных пар LEO–LEO и LEO–GEO. Сделан вывод о целесообразности внедрения гибридных RF/optical архитектур и определены перспективные направления для инженерных студенческих исследований.

Ключевые слова: лазерная межспутниковая связь, оптическая связь в свободном пространстве, высокоскоростная передача данных, система наведения и удержания луча, космические группировки, гибридные сети связи

1. Введение

Современные космические миссии и масштабное развёртывание многоспутниковых группировок предъявляют всё более высокие требования к скорости и надёжности передачи данных. Традиционные радиочастотные (RF) каналы сталкиваются с фундаментальными ограничениями: деградация спектра

в диапазонах Ka/Ku, строгие регуляторные требования Международного союза электросвязи, большие массогабаритные характеристики антенн и ограниченная пропускная способность. В условиях роста объёмов телеметрии, научных данных и пользовательского трафика возникает критическая потребность в альтернативных способах коммуникации.

Лазерная связь в свободном пространстве (Free-Space Optical, FSO) рассматривается как одно из наиболее перспективных решений данной проблемы [1]. Технология позволяет передавать информацию между аппаратами без физического контакта, используя когерентное оптическое излучение, что особенно актуально для распределённых группировок, межспутниковой ретрансляции и обеспечения космического интернета.

Цель работы – проанализировать современные технологии лазерной межспутниковой связи, оценить их преимущества и технические ограничения, а также предложить рекомендации по выбору архитектуры системы для будущих инженерных проектов.

2. Технологии лазерной межспутниковой связи: сравнительный анализ

На сегодняшний день оптическая связь конкурирует с традиционными RF-системами по ряду ключевых параметров. Рассмотрим основные принципы и характеристики.

2.1. Принцип действия и архитектурные особенности

Принцип действия: Генерация модулированного лазерного излучения (обычно на длинах волн 1064 нм или 1550 нм), коллимация телескопической оптикой, передача узконаправленным лучом, приём на фотодетектор (лавинные фотодиоды или APD-матрицы) и когерентная/прямая демодуляция.

Преимущества:

Экстремальная пропускная способность: от 10 до 100+ Гбит/с на канал [2].

Компактные размеры оптической системы по сравнению с СВЧ-антеннами (диаметр апертуры 5–15 см).

Высокая направленность луча (расходимость $<10\text{--}20$ мкрад), что обеспечивает низкую вероятность перехвата и помехозащищённость.

Отсутствие необходимости лицензирования частотного спектра [4].

Недостатки:

Сверхвысокие требования к точности наведения и удержания луча (РАТ).

Чувствительность к микровибрациям платформы и термическим деформациям оптики.

Сложность прохождения сигнала через атмосферу (критично для каналов Земля–спутник, менее значимо для межспутниковой связи).

Применение: Магистральные каналы внутри низкоорбитальных группировок (LEO), ретрансляция данных на геостационарные аппараты (GEO), межпланетная связь.

2.2. Сравнение с радиочастотными системами

Традиционные RF-системы обеспечивают надёжную связь в условиях неидеального наведения и атмосферных помех, однако их пропускная

способность ограничена физикой радиоволн и регуляторными нормами. Лазерные системы, напротив, используют оптический диапазон, что позволяет кратно увеличить плотность потока данных при снижении массогабаритных характеристик терминала. При этом RF остаётся критически важным для служебных команд, навигации и резервного канала на случай деградации оптической линии [5].

Параметр	Радиочастотная связь (Ka/Ku)	Лазерная связь (FSO/ISL)
Несущая частота / длина волны	12–30 ГГц / ~1–2,5 см	1064 / 1550 нм
Пропускная способность канала	0,5–2 Гбит/с	10–100+ Гбит/с
Размер передающей апертуры	Большой (0,3–1,2 м)	Компактный (5–15 см)
Расходимость луча	0,5°–2°	<0,01° (2–20 мкрад)
Влияние атмосферы	Умеренное (дождь, облака)	Критическое (для наземных шлюзов)
Точность наведения	~0,1°–0,5°	<0,001° (<5 мкрад)
Безопасность / защищённость	Низкая (широкая ДН)	Высокая (узкий луч)
Технологическая готовность (TRL)	9	7–9

2.3. Сводная таблица сравнения

3. Анализ рабочих параметров и орбитальных сценариев

В работе [6] представлены расчётные оценки бюджета оптической линии связи для типовых орбитальных конфигураций. Рассмотрены три сценария:

Внутригруппировочная связь LEO–LEO (расстояние 500–2000 км).

Ретрансляция LEO–GEO (расстояние ~36 000 км).

Магистральная связь GEO–GEO (расстояние ~40 000 км).

Результаты расчётных оценок (для стандартного терминала мощностью 2–5 Вт, диаметр приёмной апертуры 10 см, модуляция QPSK/16-QAM):

Орбитальная пара	Типовое расстояние, км	Целевая скорость, Гбит/с	Требуемая точность наведения
LEO ↔ LEO	500–2 000	10–50	<10 мкрад
LEO ↔ GEO	35 000–42 000	5–20	<3 мкрад
GEO ↔ GEO	~40 000	20–100	<2 мкрад

Вывод: Максимальная эффективность достигается при использовании коротких дистанций внутри LEO-группировок и оптимизированных алгоритмах

компенсации доплеровского сдвига и орбитального дрейфа. Однако дальнейшие дистанции требуют увеличения мощности передатчика и внедрения когерентного приёма.

4. Технические вызовы и пути их решения

Несмотря на коммерциализацию, внедрение лазерной связи в космические системы сталкивается с рядом проблем:

Точность наведения луча (РАТ). Решение: использование двухступенчатых систем (грубое наведение по звёздным датчикам + точное наведение быстродействующими пьезозеркалами), внедрение предиктивных алгоритмов на основе нейросетей.

Виброизоляция и динамическая стабильность. Решение: применение пассивных демпферов, активных платформ стабилизации и угломерных гироскопов с частотой считывания >1 кГц.

Термооптические искажения. Решение: атермализованные оптические схемы, теплоотводящие радиаторы с высокоэмиссионным покрытием, цифровая компенсация волнового фронта.

Фрагментация протоколов и стандартизация. Решение: активная работа консорциумов (CCSDS, ITU) над едиными стандартами физического и канального уровня, разработка гибридных RF/optical терминалов с автоматическим резервированием.

5. Заключение и перспективы

Лазерная межспутниковая связь перешла из стадии экспериментов в категорию стандарта де-факто для новых космических группировок. На основе проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

Для магистральных каналов внутри группировок оптическая связь обеспечивает пропускную способность, недостижимую для радиочастотных аналогов, при существенно меньших массогабаритных характеристиках.

Ключевым барьером остаётся точность удержания луча, которая решается внедрением интеллектуальных РАТ-систем и гибридных архитектур с автоматическим переключением на RF-канал при деградации оптической линии.

Внедрение лазерной ISL позволит кратно увеличить пропускную способность орбитальной инфраструктуры, снизить задержки передачи данных и повысить надёжность миссий в условиях роста объёмов космического трафика.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение помехоустойчивости модуляции, разработку адаптивных систем компенсации турбулентности (для наземных шлюзов) и проведение натуральных экспериментов на орбитальных платформах.

Библиографический список

1. Hemmati H. Near-Earth Laser Communications. 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – 584 p.
2. Toyoshima M. Trends in Satellite Laser Communication and Optical Ground Stations // Journal of Lightwave Technology. – 2022. – Vol. 40, № 12. – P. 3890–3902.

3. Saengudomlert P., Domínguez-Jiménez M. Coherent vs. Direct Detection for Inter-Satellite Optical Links: A Comparative Study // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 112450–112462.

4. Tesat-Spacecom. Laser Communication Terminals for LEO and GEO Constellations: Technical White Paper. – Backnang, 2024.

5. CCSDS. Optical Communications: Overview and Roadmap (CCSDS 141.0-B-3). – Washington, D.C., 2025.

6. Juraev D. Inter-satellite optical wireless communication (Is-OWC): trends, a review, challenges and opportunities // Journal of Space Engineering. – 2024. – Vol. 8, № 2. – P. 45–62.

УДК 621.313.3: 620.179

Обзор методов диагностики дефектов постоянных магнитов в синхронных электрических машинах

Горбатков П.В., Султангареев Д.У., Татауров А.И., Зяблицев П.А.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация: синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) широко применяются в промышленности, электромобилях, аэрокосмической технике и возобновляемой энергетике благодаря высокой эффективности, мощности и надёжности [3, 9]. Однако в процессе эксплуатации они подвержены различным повреждениям, среди которых особое место занимают дефекты постоянных магнитов – механические трещины, сколы и размагничивание [2, 5, 8]. Эти повреждения приводят к ухудшению рабочих характеристик, снижению КПД, росту вибраций и шума, а в тяжёлых случаях – к разрушению ротора [7, 8]. Поэтому разработка эффективных методов диагностики состояния магнитов является актуальной задачей, позволяющей предотвращать аварийные остановки и продлевать срок службы машин [4, 9].

Понимание физических принципов, лежащих в основе этих методов, базируется на фундаментальных понятиях магнетизма. Магнитное поле, возникающее вокруг движущихся зарядов, характеризуется векторами магнитной индукции B и напряженности H , связанными соотношением $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$, где μ – относительная магнитная проницаемость среды [1]. Эта проницаемость и определяет реакцию материала на внешнее поле.

Ключевые слова: электрические машины, дефекты в электрических машинах.

Типы дефектов постоянных магнитов

Дефекты ПМ можно разделить на две основные категории: механические повреждения и размагничивание. Механические повреждения (трещины, сколы)

возникают из-за вибраций, ударных нагрузок, дефектов изготовления или высокочастотных пульсаций момента [2, 8]. Размагничивание может быть вызвано чрезмерной температурой, токами короткого замыкания, старением магнита или обратным полем реакции якоря [3, 5]. Частичное размагничивание снижает потокосцепление, что приводит к росту тока обмотки статора для поддержания момента, дополнительному нагреву и дальнейшей деградации магнитов [7, 9]. Как механические, так и магнитные дефекты нарушают симметрию магнитного поля в воздушном зазоре, порождая характерные гармоники в токах, напряжениях и электромагнитном моменте [6].

Методы диагностики

Фундаментальные и классические методы контроля

Прежде чем перейти к современным методам диагностики, важно отметить, что существуют классические методы неразрушающего контроля, основанные на тех же физических принципах. Так, магнитопорошковая дефектоскопия использует поля рассеяния, возникающие над дефектами в намагниченной детали. Эти поля притягивают ферромагнитные частицы, визуализируя дефект [1]. Для этого применяются различные способы намагничивания (полюсное, циркулярное, комбинированное) с использованием постоянных магнитов, электромагнитов или соленоидов. Эффективность выявления дефекта, его ориентация и местоположение напрямую зависят от направления и величины тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля H_t на поверхности детали. Другой метод – феррозондовая дефектоскопия – позволяет измерять составляющие магнитного поля (нормальную H_n и тангенциальную H_t) над поверхностью изделия и выявлять дефекты по характерному изменению этих компонент [1]. Эти методы являются предшественниками и основой для более сложных диагностических систем.

Анализ гармонических составляющих

Наиболее распространённый подход в диагностике СДПМ – анализ спектра сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для дефектов магнитов характерно появление гармоник на частотах

$$f_{\text{деф}} = f_s \left(1 \pm \frac{k}{p} \right),$$

где f_s – частота питающей сети, p – число пар полюсов, k – целое число [6, 9]. В работе [2] показано, что при трещинах магнита в спектре тока статора возникают составляющие 175, 275, 625 и 725 Гц, а в спектре момента – 225, 675 и 725 Гц. При частичном разрушении магнита появляются дополнительные гармоники 25 и 125 Гц. В работе [8] любое изменение геометрии или свойств магнитов оставляет свой «след» на спектральной характеристике линейного тока. Однако анализ Фурье не даёт информации о времени возникновения дефекта и плохо применим при нестационарных режимах [9].

Время-частотные методы

Для учёта нестационарности применяют кратковременное преобразование Фурье (STFT), вейвлет-преобразование и преобразование Гильберта–Хуанга.

STFT позволяет получать спектрограммы, отражающие изменение частотного состава во времени [4]. В работе [9] с помощью STFT выделены гармоники тока, чувствительные к степени размагничивания. Вейвлет-анализ даёт лучшее разрешение на высоких частотах, но его результат сильно зависит от выбора материнского вейвлета [3]. Преобразование Гильберта–Хуанга адаптируется к сигналу и эффективен при динамических режимах [3].

Конечно-элементный анализ

Конечно-элементное моделирование (МКЭ) широко используется для исследования влияния дефектов на электромагнитные параметры [5]. В [2] с помощью двумерного МКЭ исследованы три стадии разрушения магнита: начальная трещина, рост трещины и частичное разрушение. Показано, что при росте трещины увеличиваются пульсации момента и падает средний момент. В [5] разработана аналитическая модель поля при локальном размагничивании, подтверждённая МКЭ. В [7] предложена математическая модель магнитного поля для двухполюсных машин с локальным размагничиванием. В работе [8] использовали МКЭ для моделирования трещины в магните шириной 0.01 мм и показали, что такой минимальный дефект вызывает возмущение в спектре магнитной индукции в области 42–59-й гармоник. МКЭ позволяют детально изучать физику процессов, но требуют больших вычислительных ресурсов [3].

Методы машинного обучения

Современные системы диагностики всё чаще используют алгоритмы машинного обучения для автоматической классификации состояний. В [6] предобученная свёрточная нейронная сеть AlexNet на спектрограммах STFT тока статора достигла точности 99,94% при классификации степени разрушения магнита (от 3% до 83%). Аналогично, в [4] комбинация STFT и CNN (EfficientNetV2B0) позволила с F1-мерой до 1,0 диагностировать повреждения магнита в синхронном генераторе. В [9] сравнивались методы k-ближайших соседей (KNN) и многослойного персептрона (MLP) на основе амплитуд гармоник тока; оба дали 100% точность, но KNN работал втрое быстрее.

Метод диагностической обмотки

В [7] предложен универсальный метод для двухполюсных машин, основанный на измерении ЭДС дополнительной трёхфазной обмотки, уложенной в свободные пазы. Асимметрия этой ЭДС указывает на наличие трещины или локального размагничивания независимо от типа основной обмотки и числа пазов. Метод не требует спектрального разложения и устойчив к влиянию нагрузочных токов.

Сравнительный анализ

Все рассмотренные методы имеют свои достоинства и ограничения. Классический спектральный анализ (БПФ) прост, но неэффективен при переменной нагрузке и не локализует дефект во времени [9]. Время-частотные методы (STFT, вейвлеты) позволяют отслеживать динамику, но требуют выбора параметров окна и могут страдать от низкого разрешения [4]. Моделирование методом конечных элементов даёт наиболее детальную

картину, однако оно трудоёмко и не подходит для онлайн-мониторинга [2, 5]. Машинное обучение, особенно глубокие нейронные сети, обеспечивает высокую точность автоматической классификации и может работать в реальном времени, но нуждается в представительных обучающих выборках и может быть чувствительно к шуму [4, 6]. Комбинация методов (например, STFT + CNN) позволяет объединить преимущества время-частотного анализа и автоматического распознавания образов. Как показано в [4, 6], такие системы способны различать не только факт наличия дефекта, но и степень его тяжести. При этом простота алгоритмов типа KNN может быть достаточной при хорошем выборе признаков [9]. Универсальный метод с дополнительной обмоткой [7] интересен тем, что не требует сложной обработки сигналов и может быть легко интегрирован в существующие машины. Предложенный в [8] подход, основанный на сигнатурном анализе тока, также представляется перспективным, так как он может быть реализован в рамках существующих систем управления, использующих датчики тока. Важно подчеркнуть, что все эти современные методы опираются на фундаментальные принципы, лежащие в основе классической магнитной дефектоскопии [1], такие как анализ полей рассеяния и их составляющих.

Заключение

Диагностика дефектов постоянных магнитов в синхронных машинах является актуальной научно-технической задачей. Современные методы включают в себя гармонический анализ, время-частотную обработку, конечно-элементное моделирование и алгоритмы машинного обучения. Подходы, основанные на глубоких нейронных сетях и спектрограммах токов, позволяют с высокой точностью классифицировать тип и степень повреждения. Дальнейшие исследования должны быть направлены на адаптацию этих методов к условиям реальной эксплуатации, учёт шумов и вариаций нагрузки, а также на разработку бортовых диагностических систем для электроприводов и ветрогенераторов.

Библиографический список

1. А. Л. Бобров, Е. В. Лесных Основы магнитного неразрушающего контроля // 2018.
2. Abdolmaleki M., Asef P., Vagg C. Unraveling Magnet Structural Defects in Permanent Magnet Synchronous Machines—Harmonic Diagnosis and Performance Signatures // *Magnetism*. 2024. № 4 (4). С. 348–367.
3. Chen Y. [и др.]. Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review // *Applied Sciences*. 2019. № 10 (9). С. 2116.
4. Cömert M., Ünsal A. Diagnosis of Broken Magnet Faults in Permanent Magnet Synchronous Generators Based on CNN Model.
5. Fitouri M., BenSalem Y., Abdelkrim M. N. Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machine Considering Demagnetization Fault Based on Finite Element Method.
6. Ghafouri Matanagh A. [и др.]. Classifying the Percentage of Broken Magnets in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Combined Short-Time Fourier Transform and a Pre-Trained Convolutional Neural Network // *Energies*. 2024. № 2 (17). С. 368.
7. Ismagilov F. R., Vavilov V. Ye., Ayguzina V. V. Method for diagnostic of permanent-magnet electrical machines 2018.

8. Petushkov M. Yu., Kholodilov S. S. Permanent magnet synchronous motors fault finding by linear current // Интеллектуальная электротехника. 2020. № 4. С. 52–60.

9. Pietrzak P., Wolkiewicz M. Demagnetization Fault Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Stator Current Signal Processing and Machine Learning Algorithms // Sensors. 2023. № 4 (23). С. 1757.

УДК 621.313.13

Сравнительный анализ коллекторных и бесколлекторных электродвигателей для применения в беспилотных летательных аппаратах

Горустович В.В., Исаева М.В., Харатян С.М.

МАОУ Центр образования № 10 им. Хохлова А.И., г. Уфа

Аннотация. В статье рассмотрены принципы работы и конструктивные особенности двигателей. Установлено, что коллекторные моторы из-за низкого КПД и ограниченного ресурса подходят только для сверхлёгких микро-БПЛА и учебных моделей благодаря своей простоте и дешевизне. Бесколлекторные двигатели, обладающие высоким КПД и надёжностью за счёт отсутствия щёточно-коллекторного узла, являются стандартом для профессиональной аэрофотосъёмки, гоночных дронов и космической техники.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), коллекторный двигатель, бесколлекторный двигатель, электромеханика, коэффициент полезного действия (КПД), время полёта, аэрофотосъёмка, FPV-дроны.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) сегодня являются одним из самых динамично развивающихся направлений авиационной техники. Они используются для аэрофотосъёмки, мониторинга местности, доставки грузов и даже в космических миссиях, как например, марсианский вертолёт «Ingenuity». Ключевым элементом любого мультироторного БПЛА является электродвигатель, преобразующий энергию аккумулятора в тягу. На рынке авиамоделизма представлены два принципиально разных типа электрических машин: коллекторные и бесколлекторные. Перед начинающим конструктором встаёт сложный вопрос выбора: сэкономить на стоимости компонентов или вложиться в более дорогую и технологичную систему? Актуальность работы заключается в том, что ошибочный выбор двигателя приводит либо к неоправданному удорожанию простого учебного аппарата, либо к низкой эффективности и быстрому выходу из строя аппарата для серьёзных задач.

Цель работы: провести сравнительный анализ коллекторных и бесколлекторных электродвигателей на основе изучения технической литературы и открытых баз данных, чтобы выработать рекомендации по их применению в различных классах БПЛА.

Теоретическая часть: физические принципы и конструктивные особенности.

Для понимания различий необходимо обратиться к основам электротехники и электромеханики. Коллекторный двигатель: является классической машиной постоянного тока. Его конструкция включает в себя:

1. Статор с постоянными магнитами.
2. Ротор с обмоткой возбуждения.
3. Щёточно-коллекторный узел.

Принцип действия основан на взаимодействии магнитных полей статора и ротора. Для того чтобы ротор не останавливался в нейтральном положении, щётки, скользящие по ламелям коллектора, механически переключают полярность напряжения на обмотках ротора. Данный процесс неизбежно сопровождается трением и искрением [1]. С точки зрения электротехники, наличие скользящего контакта является главным источником потерь энергии и ограничивает максимальную частоту вращения.

Бесколлекторный двигатель: (вентильный двигатель) конструктивно инвертирован. Обмотки, создающие магнитное поле, неподвижны (статор), а ротор состоит из набора мощных неодимовых постоянных магнитов. Механический коммутатор отсутствует. Вместо него управление осуществляет электронный регулятор оборотов (ESC), который формирует трёхфазное переменное напряжение, синхронизированное с текущим положением ротора [2]. Отсутствие механического трения в токоподводящей цепи кардинально меняет надёжность и КПД системы.

Таблица 1

Сводные технические характеристики

Параметры	Коллекторный тип	Бесколлекторный
Коэффициент полезного действия	50–60%	75–85%
Удельная мощность	Низкая	Высокая
Ресурс непрерывной работы	Ограничен износом щёток	Ограничен износом подшипников
Электромагнитная совместимость	Создаёт сильные радиопомехи	Помехи минимальные при исправном ESC
Сложность подключения	2 провода	3 провода
Стоимость комплекта	Низкая	Высокая

Разница в КПД имеет решающее значение для авиации. Согласно формуле времени полёта мультикоптера (в упрощённом виде $t = C * U * \text{КПД} / P$, где C – ёмкость, U – напряжение, P – потребляемая мощность), увеличение КПД с 60% до 80% даёт прирост времени полёта более чем на 30% при той же ёмкости батареи. Это означает, что бесколлекторный дрон либо дольше находится в воздухе, либо может нести более тяжёлую полезную нагрузку (камеру, датчики).

Коллекторный узел является «расходником». Продукты износа графитовых щёток загрязняют внутреннюю полость двигателя, что приводит к постепенной деградации характеристик. Для беспилотной авиации, где отказ двигателя означает неизбежное падение, такое снижение надёжности недопустимо. Бесколлекторные моторы лишены этого конструктивного недостатка.

Несмотря на очевидное техническое превосходство бесколлекторных систем, утверждать, что коллекторные двигатели полностью исчезли из БПЛА, было бы неверно. На основе проведённого анализа можно сформулировать следующие критерии выбора типа силовой установки.

Область применения коллекторных двигателей:

1. Сверхлёгкие микро-БПЛА.

При взлётной массе менее 50–70 граммов установка трёхфазного регулятора и тяжёлых бесколлекторных моторов становится нерациональной. Выигрыш в массе за счёт простоты коллекторной системы перекрывает потери в КПД.

2. Одноразовые или учебные аппараты.

В ситуациях, где высока вероятность поломки дрона на этапе обучения пилотированию, низкая стоимость коллекторного мотора является значительным плюсом.

Область применения бесколлекторных двигателей:

1. Профессиональные БПЛА для аэрофотосъёмки и картографии. Требуется высокая стабильность, низкий уровень вибраций (отсутствие биений из-за износа щёток) и длительное время полёта.

2. Гоночные FPV-дроны требуют огромной удельной мощности и мгновенного отклика на управление, что могут обеспечить только бесколлекторные системы.

3. Перспективные разработки для космоса например, в конструкции марсианского дрона «Ingenuity» использовался специально разработанный бесколлекторный двигатель. В условиях крайне разреженной атмосферы Марса и больших перепадов температур механический коллекторный узел просто не смог бы работать из-за проблем со смазкой и искрением в вакуумоподобной среде [4].

Заключение

В ходе выполнения работы был проведён детальный сравнительный анализ коллекторных и бесколлекторных электродвигателей применительно к задачам беспилотной авиации. На основе анализа технической литературы и физических принципов работы установлено:

1. Коллекторные двигатели остаются экономически оправданным решением исключительно в сегменте сверхлёгких микро-дронов благодаря низкой цене и простоте подключения.

2. Бесколлекторные двигатели являются базовым стандартом для всех БПЛА, от которых требуется надёжность, высокое время полёта и возможность подъёма полезной нагрузки. Отсутствие щёточно-коллекторного узла обеспечивает кардинальное увеличение КПД и ресурса.

3. С точки зрения развития авиационной и космической техники, эволюция электропривода БПЛА однозначно идёт по пути совершенствования бесколлекторных систем и алгоритмов управления ими.

Библиографический список

1. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2006. – 607 с.
2. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.
3. Брускин Д.Э. и др. Электрические машины и микромашины. – М.: Высшая школа, 1990. – 528 с.
4. Balaram B., Canham T., Duncan C., et al. Mars Helicopter Technology Demonstrator // 2018 AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. – AIAA 2018-0023. – 2018.

УДК 621.3.042.12

Сравнительный анализ поведения СДПМ при обрыве фазы при использовании одного и двух инверторов

Ибатулина Г.Р., Татауров А.И., Агадуллина М.С.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация: в статье представлены результаты сравнительного анализа поведения синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) при обрыве фазы в двух конфигурациях: одноинверторная система с соединением обмоток в «звезду» и двухинверторная система, выполненная по схеме две «звезды» с изолированными источниками питания. Проанализировано влияние обрыва фазы на электромагнитный момент, частоту вращения и фазные токи. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании электроприводов для электромобилей и других критических применений.

Ключевые слова: СДПМ, обрыв фазы, двухинверторная система, две звезды, изолированные источники питания, отказоустойчивость.

Введение

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) широко применяются в электромобилях, авиационной и судовой технике благодаря высокой эффективности и удельной мощности. Однако при возникновении обрыва фазы у классической одноинверторной системы может потребоваться переход в аварийный режим, ограничение мощности или немедленный останов.

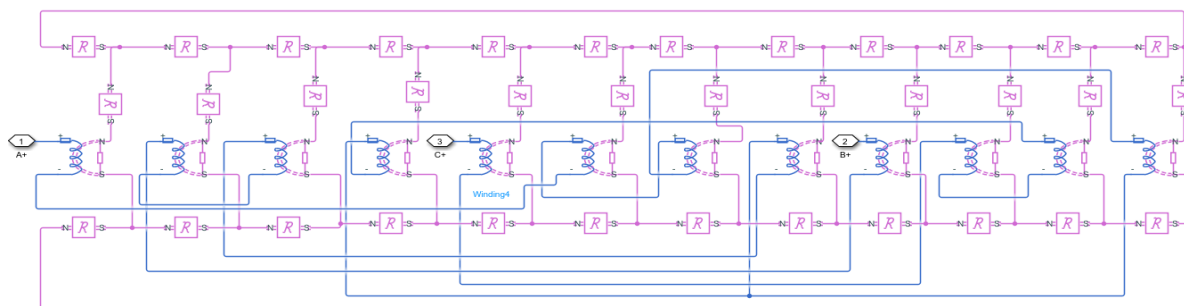


Рис. 1. Схема намотки обмоток статора и обозначение выводов для подключения к одному инвертору

В одноинверторной системе концы обмоток статора (рисунок 1) соединены по схеме «звезда» внутри двигателя. Для управления используется один двухуровневый инвертор. Данная топология характеризуется простотой и низкой стоимостью, однако имеет ограниченные возможности для реализации отказоустойчивого управления при обрыве фазы [1].

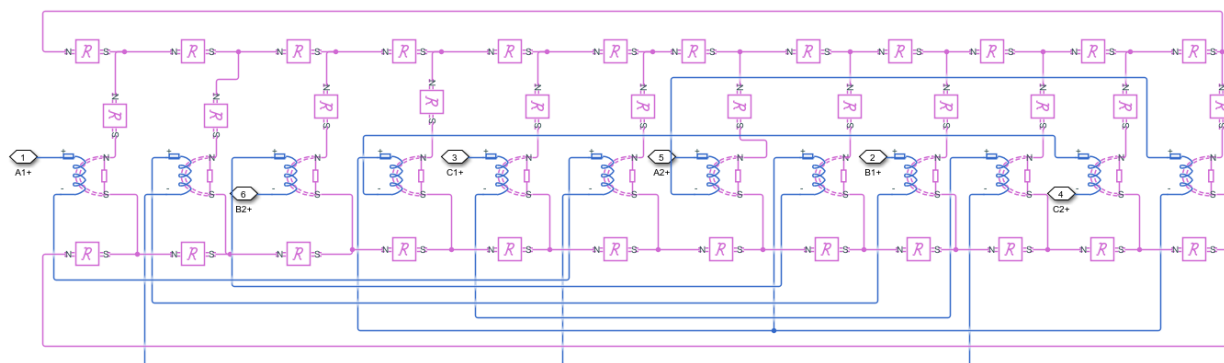


Рис. 2. Схема намотки обмоток статора и обозначение выводов для подключения к двум инверторам

В двухинверторной системе (рис. 2) шесть выводов обмотки разделены на две независимые трехфазные группы. Такая конфигурация позволяет получить дополнительные степени свободы управления.

Параметры СДПМ, принятого в качестве объекта управления для исследования, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры СДПМ

Наименование параметра	Значение
Число пар полюсов	5
Число зубцов статора	12
Сопротивление обмотки статора при 20 °С, Ом	0.04
Момент инерции ротора, кг*м ²	0.001
Потокосцепление постоянных магнитов, Вб	0.24
Индуктивность по оси d, мГн	0.82
Индуктивность по оси q, мГн	0.82

Математическая модель СДПМ

Моделирование работы СДПМ проводилось при частоте вращения 500 об/мин. Выбор данной скорости обусловлен необходимостью снижения влияния противо-ЭДС на диагностические признаки при сохранении всех характерных электромагнитных процессов, сопровождающих обрыв фазы.

В нормальном режиме работы математическая модель СДПМ [2] в осях d-q описывается следующими уравнениями (1-2):

$$u_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_e \Psi_{qs}; \quad (1)$$

$$u_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} - \omega_e \Psi_{ds}; \quad (2)$$

где u_{ds} – составляющая напряжения статора по оси d; u_{qs} – составляющая напряжения статора по оси q; r_s – активное сопротивление статора; i_{ds} – составляющая тока статора по оси d; i_{qs} – составляющая тока статора по оси q; Ψ_{qs} – составляющая потокосцепления статора по оси q; Ψ_{ds} – составляющая потокосцепления статора по оси d; ω_e – электрическая частота вращения ротора.

Электромагнитный момент (3) определяется как:

$$M = \frac{3}{2} p [\Psi_m i_{qs} + (L_d + L_q) i_{ds} i_{qs}]; \quad (3)$$

где p – число пар полюсов, Ψ_m – потокосцепление по магнитам.

Для двигателей с поверхностным расположением магнитов справедливо равенство $L_d \approx L_q$, и выражение момента (4) упрощается:

$$M = \frac{3}{2} p \Psi_m i_{qs}; \quad (4)$$

При возникновении обрыва фазы в одноинверторной системе с соединением обмоток, ток в поврежденной фазе (например, в фазе А) становится равным нулю

$$I_a = 0; \quad (5)$$

Токи в оставшихся фазах В и С при этом перераспределяются:

$$I_b + i_c = 0; \quad (6)$$

Моделирование обрыва фазы

Имитационное моделирование проведено в среде моделирования MatLab/Simulink [3-4]. При напряжении в звене постоянного тока – 48 В для одноинверторной системы и 24 В – для двухинверторной системы, при моменте нагрузки на валу СДПМ – 0.5 Н*м. При переходе на двухинверторную схему номинальное напряжение на фазах двигателя должно сохраниться, но так как в формировании напряжения участвуют два инвертора, их напряжение постоянного тока можно снизить

$$V_{dc} = V_{dc1} + V_{dc2}; \quad (7)$$

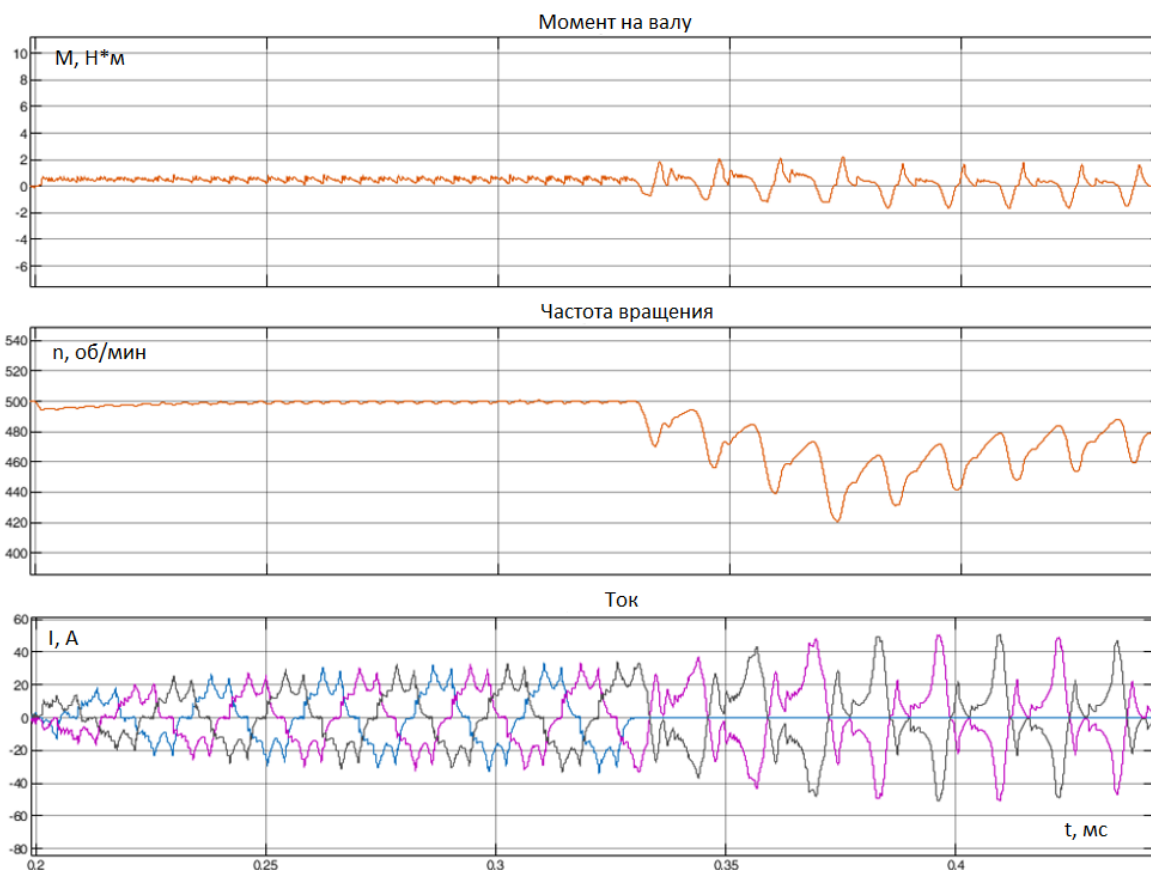


Рис. 3. Результат моделирования работы СДПМ с одним инвертором: в момент времени 0.2 секунды подается нагрузка 0.5 Н*м, в 0.33 секунды – обрыв фазы А, 0.37 с – снятие нагрузки

По графикам на рис. 3 видно, что при обрыве фазы ток в поврежденной фазе А падает до нулевого значения, амплитуда токов в фазах В и С возрастает до 48 А. Возникает асимметрия токов, обусловленная нарушением симметрии питающих напряжений. Возникают пульсации электромагнитного момента (≈ 1.8 Н*м) и скорости (≈ 42 об/мин). Поскольку момент статической нагрузки остается равным 0.5 Н*м, частота вращения снижается. Уменьшение скорости вызывает снижение противо-ЭДС и дополнительный рост токов в фазах В и С, что усугубляет ситуацию и может привести к полной остановке двигателя или срабатыванию защиты инвертора.

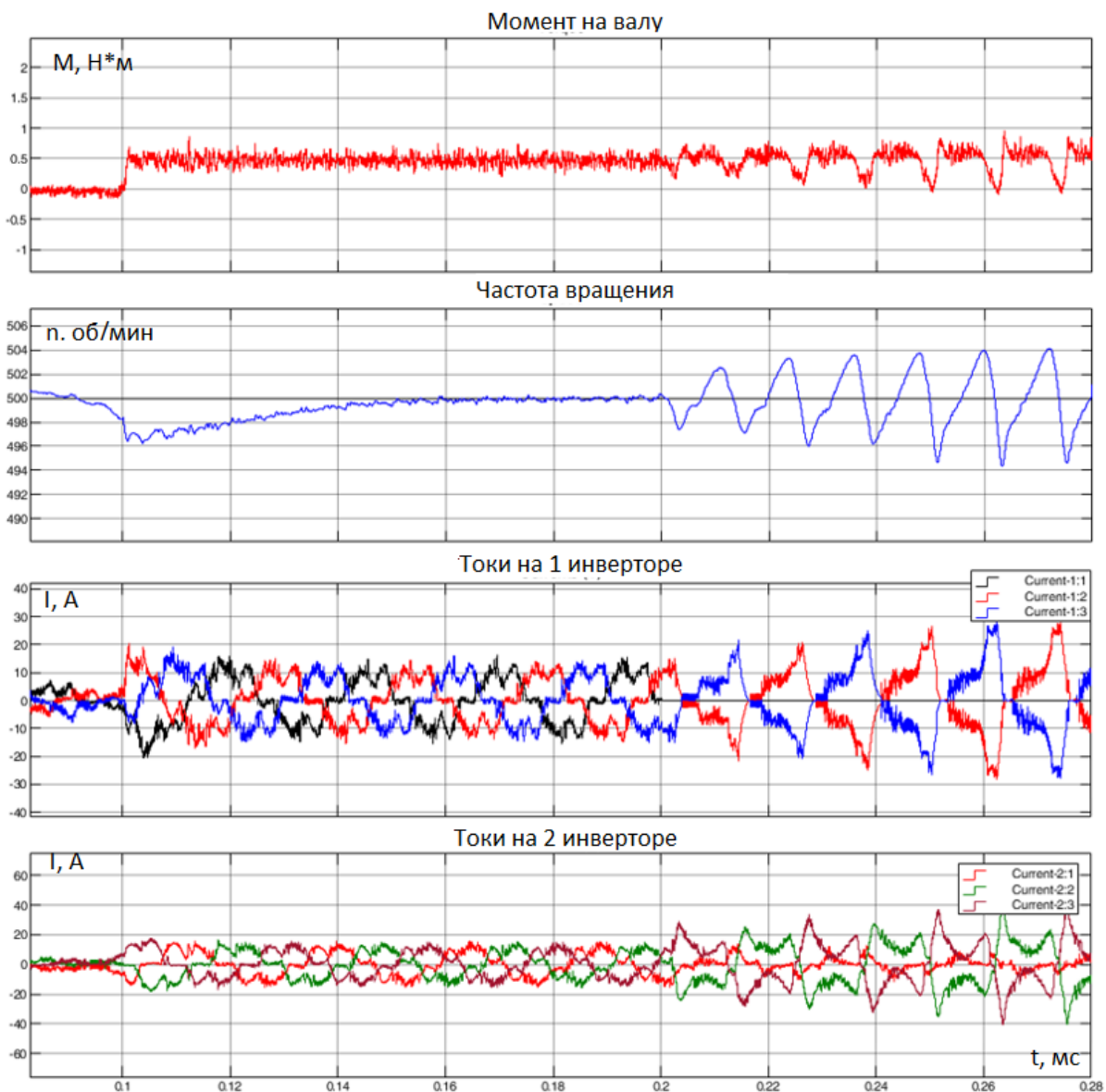


Рис. 4. Результат моделирования работы СДПМ с двумя инверторами: в момент времени 0.1 секунды подается нагрузка 0.5 Н*м, в 0.33 секунды – обрыв фазы А первого инвертора

При возникновении обрыва фазы А у одного инвертора в двухинверторной системе (рис. 4) наблюдаются следующие особенности в распределении токов: ток в поврежденной фазе становится нулевым, однако наличие двух независимых инверторов и двух трёхфазных групп создаёт дополнительные возможности перераспределения токовой нагрузки и поддержания электромагнитного момента. Амплитуды фазных токов в первом инверторе не превышают 30 А, во втором – 40 А. Пульсации электромагнитного момента составляют 1 Н*м, это ниже по сравнению с одноинверторной системой. СДПМ сохраняет способность поддерживать заданную частоту вращения и момент нагрузки: отклонение скорости не превышает 1%.

Заключение. Результаты моделирования показывают, что в рассмотренных условиях двухинверторная конфигурация по схеме «две звезды» с изолированными источниками питания обеспечивает более благоприятное

поведение СДПМ при обрыве одной из фаз по сравнению с классической одноинверторной системой: пульсации момента и скорости оказываются ниже, а способность поддержания вращения сохраняется лучше. Полученный эффект обусловлен структурной избыточностью системы и дополнительными возможностями перераспределения токовой нагрузки между независимыми трёхфазными группами.

Библиографический список

1. A multiphase PMSM guide for high reliability electrified applications // OPAL-RT URL: <https://www.opal-rt.com/blog/a-multiphase-pmsm-guide-for-high-reliability-electrified-applications/> (дата обращения: 10.04.2026).

2. Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Моделирование системы векторного управления тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами // теория и практика автоматизированного электропривода. – 2022. – № 2. – С. 10-17.

3. Faulted PMSM // MATLAB URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/motor-pmsm-faulted.html> (дата обращения: 10.04.2026).

4. Shamsi-Nejad M. A. et al. Fault tolerant and minimum loss control of double-star synchronous machines under open phase conditions //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Т. 55. – № 5. – С. 1956-1965.

УДК 621.313.019.3

Современные тенденции в проектировании отказоустойчивых модульных электрических машин

Хамзин Ф.С., Султангареев Д.У., Зяблицев П.А.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация: в условиях ужесточения требований к надежности, энергоэффективности и удельной мощности электроприводов, особенно в авиационной, автомобильной и морской отраслях, классические трехфазные электрические машины с распределенными обмотками часто не могут обеспечить необходимый уровень отказоустойчивости. Модульный подход к проектированию, предполагающий разделение статора на функционально независимые блоки с индивидуальными инверторами, рассматривается как одно из наиболее перспективных направлений повышения надежности. В настоящей статье представлен обзор научных достижений в области проектирования отказоустойчивых модульных электрических машин.

Ключевые слова: модульные электрические машины, отказоустойчивость, интегрированный модульный привод, сосредоточенные обмотки, сегментированный статор, система охлаждения.

1. Введение

Глобальный переход к низкоуглеродной экономике и ужесточение экологических нормативов стимулируют развитие электротранспорта и электрифицированных систем в авиации и судостроении. В этих областях критически важным становится обеспечение высокой надежности электроприводов, поскольку их отказ может привести к катастрофическим последствиям [1, 2]. Классические трехфазные синхронные машины с распределенными обмотками, обладая высокой удельной мощностью, демонстрируют низкую отказоустойчивость из-за сильной электромагнитной связи между фазами и отсутствия внутренней избыточности [3].

Модульное построение электрических машин, предусматривающее разделение статора на независимые секции, каждая из которых питается от собственного инвертора, позволяет существенно повысить живучесть системы [4]. Дополнительным резервом надежности является применение многофазных обмоток (5, 6, 9 и более фаз), обеспечивающих сохранение работоспособности при отказе одной или нескольких фаз [5].

Цель настоящей работы – представить систематический обзор современных научных исследований в области отказоустойчивых модульных электрических машин. В статье рассмотрены конструктивные решения статора и ротора, методы управления, системы охлаждения, вопросы высоковольтной изоляции, а также перспективы применения в электрической авиации, электромобилестроении и ветроэнергетике.

2. Концепции модульного построения и требования к отказоустойчивости

Модульная архитектура электропривода базируется на ряде принципов, обеспечивающих локализацию и подавление последствий отказов. В работе [4] выделены шесть основных требований к отказоустойчивому приводу:

- электрическая (гальваническая) изоляция модулей для предотвращения распространения токов короткого замыкания (КЗ);
- электромагнитная изоляция, достигаемая минимизацией взаимной индуктивности между фазами или модулями;
- естественное ограничение токов КЗ за счет высокой индуктивности рассеяния обмоток;
- физическое разделение модулей, исключающее межфазные замыкания;
- тепловая изоляция, предотвращающая распространение перегрева от аварийной обмотки;
- увеличенное число фаз для сохранения выходной мощности при отказе.

Модульная конструкция статора также упрощает производство и обслуживание: катушки наматываются на отдельные зубцы до сборки, а поврежденные модули могут быть заменены без полной разборки машины [6].

3. Конструктивные решения статора и обмоток

Ключевым элементом отказоустойчивой машины является выбор типа обмотки. Наибольшее распространение получили сосредоточенные обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, которые обладают высокой индуктивностью рассеяния и низкой взаимной индуктивностью [7, 8]. Сравнительный анализ однослойных и двухслойных сосредоточенных обмоток показал, что однослойные обмотки обеспечивают наилучшую электромагнитную изоляцию: взаимная индуктивность может составлять менее 0,5% от самоиндукции. Однако они имеют повышенные потери в роторе и более высокое содержание гармоник в противо-ЭДС. Двухслойные обмотки обеспечивают более высокую удельную мощность и меньшие пульсации момента, но взаимная индуктивность может достигать 3–5% [9, 10]. В работе [11] предложена гибридная обмотка, сочетающая элементы однослойной и двухслойной структур, что позволяет снизить взаимную индуктивность до пренебрежимо малых значений.

Воздушные зазоры между модулями статора являются неотъемлемой чертой модульных машин. В [12] показано, что влияние зазоров на электромагнитные характеристики зависит от соотношения числа пазов и полюсов. Для комбинации 12 пазов / 14 полюсов (где число полюсов больше числа пазов) зазоры способствуют эффекту фокусировки потока, увеличивая основную гармонику потокосцепления и средний момент на 17%. Напротив, для комбинации 12/10 зазоры ухудшают характеристики. В [13] исследованы E-образные и C-образные модульные статоры для машин с чередующимися полюсами. Показано, что E-образные статоры с зазорами позволяют повысить момент для 12/14 машин, в то время как C-образные обеспечивают меньшие пульсации момента и более низкие потери в сердечнике.

Для преодоления ограничений традиционных модульных машин, где шаг обмотки часто равен единице, в [14] предложена схема с неравным шагом. Такая конфигурация позволяет реализовать электрическую и механическую развязку модулей даже при двухслойной намотке. Анализ показал, что асимметрия параметров (разное сопротивление и индуктивность фаз) в модуле может быть скомпенсирована добавлением индуктивностей, а при аварийных режимах (обрыв или КЗ модуля) перераспределение токов позволяет сохранить до 2/3 номинального момента.

4. Конфигурации роторов и их особенности

Модульный подход применим и к ротору, что особенно актуально для вентильно-индукторных (SRM) и синхронных реактивных машин. В работах [15, 16] показано, что замена традиционного зубчатого ротора SRM на сегментированный позволяет значительно повысить момент. В сегментированном роторе магнитный поток замыкается через отдельные C-образные сегменты, что создает «короткие» пути потока и увеличивает удельную мощность. Экспериментально подтверждено, что для 12/8 SRM момент на единицу потерь в обмотке на 41% выше, чем у классической конструкции [16]. В [17] предложена машина с E-образными модулями статора и

сегментированным ротором. Результаты 3D-моделирования показали, что такая конфигурация обеспечивает наименьшую массу магнитопроводов, максимальную плотность момента и лучшие стартовые характеристики по сравнению с машинами с несегментированным ротором.

В [18] проведен анализ модульных SRM с E- и C-образными статорами. Выявлено, что для конфигурации 12/14 воздушные промежутки между сегментами усиливают эффект фокусировки потока, повышая момент на 17% и эффективность на 4%. В то же время C-образные статоры обеспечивают более низкие пульсации момента (снижение до 68%). В [19] предложен H-образный модульный статор для SRM с магнитами в роторе. Показано, что воздушные промежутки между сегментами на всех зубцах снижают гармоники высших порядков, уменьшают пульсации момента на 55% и повышают плотность момента в 2,6 раза по сравнению с E-образными конструкциями.

Для высокоскоростных машин, особенно в авиационных приложениях, актуальны роторы со сборкой Халбаха. В [20] сравниваются три типа роторов (V-образный IPM, SPM и Халбах) для шестифазной машины с малым моментом инерции. Ротор Халбаха показал наивысшее значение основной гармоники противо-ЭДС, наибольший средний момент и наименьшие пульсации. Отсутствие необходимости в ярме ротора позволяет снизить момент инерции, что критично для высокодинамичных сервоприводов.

5. Системы охлаждения электрических машин

Повышение удельной мощности модульных машин неизбежно связано с интенсификацией тепловыделения. Эффективный теплоотвод становится ключевой задачей. В работе [21] представлена система жидкостного охлаждения непосредственно в пазах статора для модульной машины 24/28. Керамические трубки (Al_2O_3), размещенные между сторонами катушек, служат как теплоотводом, так и тепловым барьером. Эксперименты подтвердили, что при трехфазном КЗ в одном модуле температура в соседнем здоровом модуле растет в 4 раза медленнее. В [22] предложена концепция «затопленного» статора для модульных SRM, где зазоры между модулями используются в качестве каналов для прокачки масла. CFD-анализ показал, что это позволяет снизить пиковую температуру на $15^{\circ}C$ по сравнению с немодульной конструкцией. Применение оребрения в каналах увеличивает теплоотдачу в 5 раз.

В проекте интегрированного модульного привода мощностью 1 МВт для электрической авиации [23, 24] разработана комплексная система терморегулирования. Силовые модули охлаждаются с помощью микроструктурированных хладагентов на основе полиальфаолефина. Статор охлаждается по принципу «затопленных пазов» с тем же хладагентом, что обеспечивает не только интенсивный теплоотвод, но и высокую электрическую прочность изоляции. Ротор охлаждается принудительным воздухом, подаваемым через полый вал и систему сопел. Моделирование показало, что температура углеродного бандажа ротора не превышает $101^{\circ}C$ при 20 000 об/мин.

Заключение

В результате проведенного обзора показано, что модульный подход является не просто эволюционным шагом, а фундаментальным изменением парадигмы проектирования, обеспечивающим беспрецедентный уровень надежности и живучести электроприводов. Рассмотрены ключевые конструктивные решения (обмотки, статоры, роторы), методы теплового управления, системы управления, включая распределенные и бессенсорные алгоритмы, а также вопросы высоковольтной изоляции и интеграции силовой электроники.

Выявлены основные перспективные направления исследований:

- разработка стандартизированных модульных блоков;
- совершенствование методов прогнозирования ресурса изоляции;
- создание единой методологии анализа надежности гибридных систем;
- расширение применения аддитивных технологий для изготовления сложных теплоотводящих и изоляционных структур.

Представленные в обзоре результаты закладывают основу для создания следующего поколения электрических приводов, способных обеспечить безопасную и эффективную работу в самых ответственных сферах - от авиации до морской техники и возобновляемой энергетики.

Библиографический список

1. Tian, P., Zhang, X., Chen, K., Jahns, T.M., Sarlioğlu, B. Development and Testing of a Fault-Tolerant Modular Motor Drive using a PM Machine with Isolated Modules. 2024.
2. Chen, K., Tian, P., Zhang, X., Jahns, T.M., Sarlioğlu, B. Design and Performance Characteristics of a Four-Module Fault-Tolerant Modular PM Machine. 2024.
3. Jack, A.G., Mecrow, B.C., Haylock, J.A. A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high-performance fault-tolerant applications. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1996, 32(4), pp. 889–895.
4. EL-Refaie, A.M. Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2010, 57(1), pp. 107–121.
5. Barrero, F., Duran, M.J. Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines-Part I. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2016, 63(1), pp. 449–458.
6. Akita, H., Nakahara, Y., Miyake, N., Oikawa, T. New core structure and manufacturing method for high efficiency of permanent magnet motors. 38th IAS Annual Meeting, 2003, pp. 367–372.
7. Chen, H., Hua, H., Xu, S., Qi, W. Investigation of Dual Three-Phase Permanent Magnet Machines with Different Modular Windings. 2023.

8. Ishak, D., Zhu, Z.Q., Howe, D. Comparison of PM brushless motors, having either all teeth or alternate teeth wound. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2006, 21(1), pp. 95–103.
9. Sui, Y., Zheng, P., Wu, F., Yu, B., Cheng, L. Multiphase Modular Fault-Tolerant Permanent-Magnet Machine With Hybrid Single/Double-Layer Fractional-Slot Concentrated Winding. *IEEE Trans. Magn.*, 2019, 55(9), pp. 1–5.
10. Tong, C., Wu, F., Zheng, P., Yu, B., Sui, Y., Cheng, L. Investigation of Magnetically Isolated Multiphase Modular Permanent-Magnet Synchronous Machinery Series for Wheel-Driving Electric Vehicles. *IEEE Trans. Magn.*, 2014, 50(11), pp. 1–4.
11. Li, G.J., Zhu, Z.Q., Chu, W.Q., Foster, M.P., Stone, D.A. Influence of flux gaps on electromagnetic performance of novel modular PM machines. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2014, 29(3), pp. 716–726.
12. Zhou, R., Li, G.J., Zhang, K., Zhu, Z.Q., Foster, M.P., Stone, D.A. Performance Investigation of Consequent-Pole PM Machines With E-core and C-core Modular Stators. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2021, 36(2), pp. 1169–1179.
13. Gan, B., Zhang, B., Li, Q., Guihong, F., Li, G. Research on Operation of Low-Speed and High-Torque Module Combined Stator Permanent Magnetic Fault-Tolerant Motor With Unequal Span Winding. *IEEE Access*, 2020, 8, pp. 70438–70452.
14. Lawrenson, P.J., Gupta, S.K. Developments in the performance and theory of segmental-rotor reluctance motors. *Proc. IEE*, 1967, 114(5), pp. 645–653.
15. Mecrow, B.C., Finch, J.W., El-Kharashi, E.A., Jack, A.G. Switched reluctance motors with segmental rotors. *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, 2002, 149(4), pp. 245–254.
16. Ding, W., Hu, Y., Wang, T., Yang, S. Comprehensive research of modular E-core stator hybrid-flux switched reluctance motors with segmented and nonsegmented rotors. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2017, 32(1), pp. 382–393.
17. Ullah, W., Khan, F., Hussain, S., Alturise, F., Yousuf, M., Akbar, S. Consequences of Flux Gap on Intriguing Features of Modular Stator Inset Permanent Magnet Consequent Pole Synchronous Machine. *IEEE Access*, 2022, 10, pp. 49547–49561.
18. Zhou, Z., Sui, Y., Qiu, X., Zheng, P., Ma, H. Electromagnetic Design of a Six-Phase Low-Inertia Fault-Tolerant Permanent Magnet Synchronous Machine. 2024.
19. Zeng, H., Jahns, T.M., Sarlioğlu, B. Distributed Back-EMF-based Position Self-Sensing of Fault-Tolerant Permanent Magnet Modular Motor Drives for Electrical Aircraft Propulsion. 2022.
20. Wang, J., Jahns, T.M., McCluskey, P., Kizito, J., Sarlioğlu, B., Borjas, R., Swanke, J.A., Cong, Y., Yao, Z., Zeng, H., Fu, P., Schnabel, A. 2-kV 1-MW 20000-r/min Integrated Modular Motor Drive for Electrified Aircraft Propulsion. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2025.
21. Zhou, R., Li, G.J., Zhu, Z.Q., Foster, M.P., Stone, D.A., Jia, C.J., McKeever, P. Novel Liquid Cooling Technology for Modular Consequent-Pole PM Machines. 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, pp. 1–7.

22. Swanke, J., Zeng, H., Jahns, T.M. Modular Fault-Tolerant Machine Design with Improved Electromagnetic Isolation for Urban Air Mobility (UAM) Aircraft. 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 4570–4577.
23. Zeng, H., Swanke, J., Bobba, D., Sarlioğlu, B., Jahns, T.M. Discrete-Time Torque Control of High-Speed SPM Machine For Aircraft Electric Propulsion. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 6325–6331.
24. Wang, J., Wang, Y., Wang, Y. 2-kV 1-MW 20000-r/min Integrated Modular Motor Drive for Electrified Aircraft Propulsion. 2025.

УДК 629.78

Межзвездный космический корабль нового типа

Федосова А.Е.

МАОУ школа № 9 г. Уфы

Аннотация: в работе представлена новая концепция непилотируемого исследовательского космического корабля, предназначенного для длительных миссий в дальнем космосе, вплоть до выхода за пределы гелиосферы. Ключевой проблемой подобных миссий является деградация систем корабля под воздействием космической радиации, эрозии от космического мусора и истощения энергоресурса. Предлагается решение в виде архитектуры «матрёшка», где внешний аппарат выполняет функцию разгона и защиты внутреннего аппарата.

Ключевые слова: дальние космические миссии, межзвёздная среда, надёжность космических аппаратов, радиационная стойкость, «принцип матрёшки»

Для начала я проанализировала причины поломки космических кораблей и выделила основные:

Причина № 1 – радиация. За пределами магнитного поля Земли космос пронизан заряженными частицами – это солнечный ветер и галактические лучи. Когда такая частица попадает в микросхему, она может перевернуть бит памяти с нуля на единицу. Компьютер внезапно думает, что двигатель включён на полную, хотя должен быть выключен. Если таких ударов наберётся много, электроника деградирует и перестаёт работать.

Причина № 2 – вакуум и холодная сварка. На Земле любое масло защищает детали от трения. В открытом космосе масло просто испаряется. Дальше начинается страшное: две детали из одного металла, прижатые друг к другу, могут намертво слипнуться – свариться холодным способом. Механизм заклинивает. Так погиб японский телескоп «Хитоми» в 2016 году.

Причина № 3 – перепады температур. Если корабль вращается, одна его сторона жарится на Солнце при +120 °С, а другая остывает до –150 °С. Металл

то расширяется, то сжимается. Со временем появляются микротрещины. Солнечные панели трескаются, провода рвутся.

Причина № 4 – различные космические тела, мусор, которые могут пробить обшивку аппарата в космосе

Моя идея состоит в том, чтобы сделать корабль внутри корабля.

Сейчас инженеры обычно делают так: ставят на борт два или три одинаковых компьютера, два передатчика, запасные клапаны. Это помогает. Но все эти запасные части всё равно находятся снаружи и подвергаются той же радиации. Что, если спрятать внутри корабля целый второй корабль? Не просто деталь, а полностью готовый летательный аппарат с двигателем, компьютером и научными приборами. Внешний корабль станет «щитом» и «грузовиком». Когда он изнашивается, мы его сбросим. Внутренний выйдет наружу совершенно новеньким и продолжит путь. Этот тип корабля я назвала «Проматрешка». Название состоит из двух слов – «Прометей» и «Матрешка»

Этот корабль будет состоять из двух частей.

Первый корабль – Солнечный Буксир. У него огромные крылья, покрытые солнечными батареями. Пока он летит вблизи Солнца, энергии море. Электрореактивный двигатель потихоньку разгоняет всю конструкцию. Одновременно Буксир принимает на себя весь удар микрометеоритов и пыли. Его поверхность покрывается царапинами, панели мутнеют. Где-то к орбите Юпитера он уже еле работает, но свою задачу выполнил.

Второй корабль всё это время он спал внутри. Герметичный контейнер, своя атмосфера из азота, стабильная комнатная температура. Ни радиации, ни пыли, ни холодного вакуума его электроника не видела. У него нет больших солнечных панелей – только компактный ядерный генератор и собственная двигательная установка.

Наступает момент разделения, солнечный буксир раскрывается как лепестки, пироболты отстреливаются. Новый аппарат выходит в открытый космос. Буксир улетает в сторону – его миссия завершена.

Чтобы избежать одинаковых ошибок при постройке, эти два корабля будут построены на разных заводах и даже по разному принципу. Один на солнечной энергии, другой на ядерной. Это важно. Если в них есть общий дефект – например, брак в микросхемах или ошибка в программе, – то погибнут оба. А так шанс, что откажут оба одновременно, минимален. Это как в авиации: дублирующие системы жизненно важны, но лучше, чтобы они ещё и отличались.

Обычный зонд «стареет» с момента запуска. Наша внутренняя матрешка начнет стареть только после разделения, далеко от Солнца. Значит, у границы Солнечной системы он окажется с идеально чистой оптикой и свежей электроникой. Это повышает шансы достучаться до Земли с расстояния 500 астрономических единиц и больше.

Конечно, есть минусы. Запуск двух аппаратов сразу – это дорого и очень сложно. Нужны мощные ракеты или сборка на орбите. Но я думаю, что со временем наука шагнет вперед и моя идея реализуется.

Библиографический список

1. Кравчук, С. В. Обеспечение радиационной стойкости электронной аппаратуры систем управления космических аппаратов: учебное пособие / С. В. Кравчук, В. Н. Соколов, О. В. Вовк. – Москва: МАИ, 2024. – 90 с. – ISBN 978-5-4316-1209-1. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/506711> (дата обращения: 05.04.2026)
2. Усачев, Ю.В. Дневник космонавта: три жизни в космосе / Юрий Усачев. – Москва: Geleos, [2004]. – 429 с.

УДК 629.7.023:678.067

Внедрение композитных материалов в конструкцию МС-21: опыт и технологические вызовы

Хатипов И.А., Охотников М.В.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация: в статье рассматриваются ключевые этапы и технологические сложности внедрения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкцию планера российского среднемагистрального самолета МС-21. Проанализированы преимущества применения углепластиков, а также проблемы импортозамещения и технологические аспекты обработки смешанных пакетов и неразрушающего контроля конструкций из ПКМ.

Ключевые слова: композиционные материалы, МС-21, углепластик, импортозамещение, авиастроение, неразрушающий контроль, разделка отверстий.

Современное гражданское авиастроение уже трудно представить без активного использования полимерных композиционных материалов (ПКМ). Как известно, при объединении нескольких компонентов с различными характеристиками образуется принципиально новый материал, чьи итоговые свойства заметно превосходят параметры исходных составляющих [1, с. 22]. Благодаря внедрению композитов массу планера воздушного судна удаётся уменьшить на 30–40% в сравнении с аналогичной конструкцией, выполненной из традиционных металлических сплавов [1, с. 22]. МС-21 стал первой отечественной пассажирской машиной, в силовой структуре которой столь масштабно задействованы углепластики [1, с. 22].

Главное конструктивное отличие МС-21 от предшественников заключается в том, что значительная часть силовых элементов планера выполнена из полимерных композиционных материалов. По сравнению с полностью металлическими аналогами композитные конструкции обеспечивают самолёту меньшую массу и улучшенные аэродинамические характеристики, что в итоге ведёт к сокращению расхода топлива, снижению вредных выбросов и уменьшению эксплуатационных затрат [1, с. 23]. Специально для этой машины

спроектировали крыло нестандартной геометрии: благодаря увеличенному удлинению и уменьшенной толщине профиля его аэродинамическое качество возросло примерно на 5% [1, с. 23].

Внедрение ПКМ в конструкцию МС-21 потребовало решения ряда сложных технологических задач. Одна из них – обработка смешанных пакетов, состоящих из композиционных материалов, титановых и алюминевых сплавов. Такие пакеты предусмотрены конструкцией хвостового оперения и центроплана самолёта [2]. Как отмечается в работе А. А. Пикалова, проблема разделки качественных отверстий в подобных пакетах является одной из ключевых при сборке агрегатов, и её решение требует применения современных сверлильных машин с автоматической подачей [2].

Другой важной задачей является обеспечение качества и надёжности конструкций из ПКМ на всех этапах жизненного цикла. В работе А. М. Сляднева рассмотрено применение полимерных композиционных материалов в производстве авиационной техники, в том числе приведены примеры использования современных композитов в многослойных конструкциях планера самолёта МС-21 [3]. Автор представляет обзор дефектов, возникающих на стадиях изготовления, хранения, транспортировки и эксплуатации, а также описывает низкочастотные методы их контроля – импедансный метод и метод свободных колебаний [3]. Для выявления расслоений, непроклеев и других нарушений сплошности композитов предложен портативный многофункциональный дефектоскоп ДАМИ-С09, сочетающий импедансный, ударный и вихретоковый методы неразрушающего контроля [3].

Существенным вызовом для программы МС-21 стала необходимость импортозамещения композиционных материалов. Изначально крыло, центроплан и оперение самолёта производились из полимерно-композиционных материалов, волокно и смола для которых поставлялись из США [4]. После введения санкций со стороны США, которые фактически запретили американским и японским фирмам поставлять композиты для нужд российского авиапрома, перед отечественной отраслью встала задача полной замены импортных материалов [4]. По словам академика РАН, генерального директора ВИАМ Е. Н. Каблова, задача замены иностранных композитов на российские должна быть решена в течение двух лет [4].

Генеральный директор ВИАМ отметил, что все необходимые решения для импортозамещения в области применения композитных материалов в отечественном пассажирском авиалайнере уже найдены [4]. В качестве примера успешного применения отечественных разработок Е. Н. Каблов привёл мотогондолу двигателя ПД-14 – в целом в двигателе использовано 20 новых материалов, разработанных ВИАМ [4].

Таким образом, внедрение композитных материалов в конструкцию МС-21 сопровождается решением комплекса сложных научно-технических задач – от обеспечения качества отверстий в смешанных пакетах до разработки методов неразрушающего контроля и создания полностью отечественной сырьевой базы.

Полученный опыт формирует технологический задел для будущих проектов в области гражданского авиастроения.

Библиографический список

1. Попов, М. В. Применение композитных материалов в авиастроении на примере самолета МС-21 / М. В. Попов. – Текст: электронный // Молодой ученый. – 2021. – № 31 (373). – С. 22-23. – URL: <https://moluch.ru/archive/373/83400/> (дата обращения: 14.04.2026).
2. Пикалов, А. А. Особенности разделки отверстий в смешанных пакетах КМ-Тi-Al / А. А. Пикалов. – Текст: электронный // Труды ВИАМ. – 2012. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razdelki-otverstiy-v-smeshannyh-paketah-km-ti-al> (дата обращения: 14.04.2026).
3. Сляднев, А. М. Акустический неразрушающий контроль многослойных конструкций из ПКМ при производстве и эксплуатации авиационной техники / А. М. Сляднев. – DOI: 10.14489/td.2019.10.pp.036-049 // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 10. – С. 36-49. – URL: <https://www.td-j.ru/index.php/component/content/article/212-2019-10--october/2135-036-049> (дата обращения: 14.04.2026).
4. Каблов, Е. Н. О сроках полной замены иностранных композитов для МС-21 / Е. Н. Каблов. – Текст: электронный // РИА Новости (цит. по: TopWar.ru). – 2019. – 5 марта. – URL: <https://en.topwar.ru/155006-v-viam-soobschajut-o-srokah-polnoj-zameny-inostrannyh-kompozitov-na-ms-21.html> (дата обращения: 14.04.2026).

УДК 629.78.023:621.7.044.2

Использование аддитивных технологий (3D-печать) при создании ракетных двигателей замкнутой схемы

Хатипов И.А., Охотников М.В.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация: в статье анализируется внедрение методов селективного лазерного сплавления и прямого лазерного выращивания металлических порошков в производство жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), работающих по замкнутой схеме. Рассмотрены технологические преимущества аддитивных технологий при изготовлении камеры сгорания, форсуночной головки и элементов турбонасосного агрегата. Приводятся данные о внедрении данных методов в производство двигателей на предприятиях Госкорпорации «Роскосмос».

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, ракетный двигатель, ЖРД, селективное лазерное сплавление, замкнутая схема, SLM-технология, НПО Энергомаш.

Развитие ракетно-космической отрасли сегодня во многом определяется производственными технологиями, которые позволяют одновременно повышать надёжность и энергоэффективность изделий, снижая при этом их материалоёмкость и длительность изготовления. К числу таких прогрессивных методов относят аддитивные технологии, суть которых состоит в послойном плавлении материала по компьютерной трёхмерной модели в рабочей камере 3D-принтера, оборудованного лазерным источником нагрева. [1]

Жидкостные ракетные двигатели, функционирующие по замкнутой схеме с дожиганием генераторного газа, по праву считаются одними из наиболее сложных объектов машиностроения. Они включают сотни тонкостенных элементов непростой геометрии, требующих фрезеровки охлаждающих каналов, пайки сопел и сварки многочисленных силовых колец. В связи с этим внедрение аддитивных методов в производство наиболее трудоёмких и дорогих узлов – камер сгорания и форсуночных головок – приобретает особую значимость. [2]

Классическая технология получения камеры ЖРД подразумевает формирование внутренней огневой стенки с фрезерованными каналами охлаждения, на которую затем наносится медный слой гальваническим способом либо припаивается наружная силовая обечайка. Весь процесс занимает несколько месяцев и требует уникального станочного парка. Аддитивные же методы открывают возможность изготавливать детали такой сложной пространственной конфигурации, которую традиционными способами механической обработки и литья реализовать практически невозможно [2].

С помощью селективного лазерного сплавления (SLM) порошков жаропрочных бронзовых и никелевых сплавов удаётся выращивать цельную заготовку камеры с уже интегрированной внутренней системой охлаждения произвольной сложности. Исследования, посвящённые разработке технологии изготовления сопла камеры сгорания ЖРД методом SLM, показали, что такой подход не только сокращает количество сборочных операций, но и улучшает теплогидравлические характеристики охлаждающего тракта благодаря возможности создания каналов криволинейной формы [3].

Применение аддитивных технологий в ракетном двигателестроении требует проведения значительного объёма научно-исследовательских и экспериментальных работ для подтверждения соответствия установленным отраслевым нормам и правилам, а также обязательной государственной сертификации. Тем не менее, уже сейчас можно выделить несколько ключевых преимуществ, которые даёт внедрение АТ в производство ЖРД замкнутой схемы:

1. Сокращение количества деталей. Вместо сборки из полутора-двух десятков отдельных элементов камера может изготавливаться в виде ограниченного числа монолитных секций. Форсуночная головка, которая прежде состояла более чем из 400 компонентов, сегодня может быть выращена всего за несколько сварочных операций. Применение SLM-технологии повышает

точность геометрических параметров проточной части, что напрямую влияет на эффективность смесеобразования и полноту сгорания топлива [4].

2. Повышение качества охлаждения. Аддитивные методы позволяют создавать охлаждающие каналы криволинейной формы, оптимизированные по гидравлическому сопротивлению и теплосъёму, что принципиально недостижимо при фрезеровании. Это положительно сказывается на ресурсе двигателя и даёт возможность увеличивать давление в камере сгорания. Экспериментальные данные подтверждают, что использование SLM-технологии обеспечивает равномерную толщину стенок и отсутствие дефектов, типичных для паяных конструкций [3].

3. Сокращение производственного цикла. Сравнительный анализ традиционных и аддитивных технологий в ракетно-космической отрасли показывает, что аддитивные методы позволяют уменьшить время изготовления и финансовые затраты в 2,5 раза. Трудозатраты по отдельным агрегатам снижаются на 25%, а в перспективе себестоимость жидкостного ракетного двигателя может уменьшиться на 40 % [5].

В феврале 2026 года специалисты НПО «Энергомаш» совместно с АО «Композит», Институтом лазерных и сварочных технологий СПбГМУ и ВИАМ создали мощный ракетный двигатель РД-191МР с применением аддитивных технологий – прямого лазерного выращивания и селективного лазерного сплавления металлопорошковых композиций [5]. Тяга нового двигателя достигает 200 тонн. Компоненты изделия выращивались по частям, что позволило учесть различия в свойствах отдельных элементов и внедрить новые жаропрочные никелевые сплавы отечественной разработки. Экспериментальный двигатель успешно прошёл серию огневых испытаний, подтвердивших надёжность ключевых узлов и агрегатов – топливной системы, автоматики, газогенераторов, силовых элементов.

Таким образом, аддитивные технологии в ракетном двигателестроении перешли из разряда экспериментальных в разряд серийных производственных процессов. Дальнейшее развитие данного направления позволит обеспечить технологический суверенитет отечественной космической отрасли и создать конкурентоспособные двигатели нового поколения.

Библиографический список

1. Акбулатов, Э. Ш. Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии / Э. Ш. Акбулатов, В. П. Назаров, Е. В. Герасимов. – DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-682-696 // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 4. – С. 682-696. – URL: <https://journals.eco-vector.com/2712-8970/article/view/625649> (дата обращения: 14.04.2026).

2. Степанищев, Ю. Ю. Отработка применения аддитивных технологий при изготовлении ракетного двигателя малой тяги / Ю. Ю. Степанищев, В. В. Зуев, Д. А. Коровин, И. А. Батранюк, Д. В. Шемет. – Текст: электронный //

CyberLeninka. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otrabotka-primeneniya-additivnyh-tehnologiy-pri-izgotovlenii-raketnogo-dvigatelya-maloy-tyagi> (дата обращения: 14.04.2026).

3. Семерич, А. С. Разработка технологии изготовления сопла камеры сгорания ЖРД методом селективного лазерного сплавления / А. С. Семерич, К. В. Егерев, Д. Ю. Баймухаметов, Д. В. Чесноков, И. А. Логачев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докл.: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. 23–25 июня 2021 г.: в 2 т. – Самара: Самар. ун-т, 2021. – Т. 1. – С. 277-278. – URL: <http://repo.ssau.ru/jspui/handle/123456789/15253> (дата обращения: 14.04.2026).

4. Казаков, Р. А. Разработка технологического процесса изготовления экспериментальной камеры ракетного двигателя методом селективного лазерного сплавления на 3D-принтере / Р. А. Казаков, А. А. Фоменко, В. В. Гордеев, П. А. Бривкальн, И. В. Дергач. – Текст: электронный // CyberLeninka. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tehnologicheskogo-protsesta-izgotovleniya-eksperimentalnoy-kamery-raketnogo-dvigatelya-metodom-selektivnogo-lazernogo> (дата обращения: 14.04.2026).

5. Российские инженеры применили аддитивные технологии для создания ракетного двигателя. – Текст: электронный // Аддитивные технологии: информ.-аналит. портал. – 2026. – 2 марта. – URL: <https://additiv-tech.ru/news/rossiyskie-inzhenery-primenili-additivnye-tehnologii-dlya-sozdaniya-raketnogo-dvigatelya.html> (дата обращения: 14.04.2026).

ПРОЕКТЫ

Технологии изготовления роторов с постоянными магнитами для электрических машин

Гизатуллин В.Р.

МАОУ Лицей № 155 им. Героя Советского Союза Н.В. Ковшовой

Введение

Электрические машины с постоянными магнитами (ЭМПМ) представляют собой один из наиболее динамично развивающихся классов. ЭМПМ используют постоянные магниты вместо обмотки возбуждения для создания магнитного поля, что обеспечивает ряд существенных преимуществ в эффективности, массогабаритных показателях и надежности.

Современные ЭМПМ характеризуются высоким коэффициентом полезного действия (до 96% и выше), компактными размерами и широкими возможностями точного управления. В данной работе будет проведен анализ различных технологий изготовления роторов ЭМПМ.

Актуальность: Данная тема актуальна благодаря высокому КПД (до 96% и выше) и компактности таких машин. Также актуальность технологии связана с развитием новых материалов для постоянных магнитов, разработкой новых конструкций роторов и внедрением прогрессивных технологических процессов.

Цель: анализ научно-технической литературы по технологиям изготовления роторов ЭМПМ.

Задачи:

1. Выяснить в каких случаях применяются неодимовые, а в каких самарий-кобальтовые магниты в ЭМПМ.
2. Выяснить какие существуют способы фиксации постоянных магнитов и в чем их разница.
3. Описать используемые материалы и методы намотки для создания высокопрочного и легкого бандажа, компенсирующего центробежные усилия, действующие на поверхностно расположенные магниты.
4. Описать динамическую балансировку роторов ЭМПМ.
5. Описать используемые материалы магнитов.

Основным объектом моего исследования будут технологии изготовления роторов ЭМПМ. Исследование технологии изготовления роторов ЭМПМ включает анализ технологии производства.

Для исследования технологии изготовления роторов ЭМПМ можно использовать разнообразные методы, в зависимости от конкретной цели исследования. Этими методами являются: анализ литературных источников и технологических процессов.

Глава 1. Конструкция ЭМПМ

1.1. Электродвигатель с постоянными магнитами

Электрическая машина – машина, преобразующая механическую энергию в электрическую или электрическую энергию в механическую.

Электродвигатель с постоянным магнитом – это устройство, которое преобразует электрическую энергию в механическую и использует постоянные магниты вместо обмотки возбуждения для создания магнитного поля. Это обеспечивает преимущества в эффективности, массогабаритных показателях и надёжности по сравнению с традиционными электродвигателями. [1]

Принцип работы:

В основе работы электродвигателей с постоянными магнитами лежит взаимодействие магнитных полей статора и ротора, приводящее к возникновению электромагнитного момента. Ключевое отличие от традиционных электродвигателей – магнитное поле ротора создаётся не электрическим током в обмотке возбуждения, а постоянными магнитами, что исключает потери на возбуждение и повышает общий КПД. [1]

Конструктивно электродвигатель с постоянными магнитами включает следующие элементы (приложение 1 рис. 1):

1) Статор – неподвижная часть, включающая:

- сердечник статора (обычно шихтованный из электротехнической стали);
- обмотки, создающие вращающееся магнитное поле при питании от источника переменного тока или преобразователя частоты. Обмотки могут быть распределёнными и сосредоточенными.

2) Ротор – вращающаяся часть, включающая:

- сердечник ротора;
- постоянные магниты

В зависимости от способа фиксации постоянных магнитов различают следующие конструктивные исполнения роторов:

1) С поверхностным расположением магнитов (SPM) – магниты крепятся на поверхности ротора.

2) Со встроенными магнитами (IPM) – магниты размещены внутри сердечника ротора.

1.2. Конструктивные исполнения роторов с постоянными магнитами

Технологии изготовления роторов с постоянными магнитами (ПМ) для ЭМПЭ являются критически важным аспектом, определяющим производительность, надёжность и стоимость конечного продукта. Такие роторы используются в широком спектре электрических машин применяемых в разных сферах промышленности, например, для привода электромобиля (приложение 2 рис.1)

Можно выделить два основных типа роторов с постоянными магнитами по способу их крепления:

1. Роторы с поверхностным расположением магнитов – магниты крепятся непосредственно на поверхности сердечника.

2. Роторы с внутренним расположением магнитов – магниты встраиваются внутрь сердечника в специальные пазы или полости.

Производительность электрических машин, критически зависит от материала и конструкции, из которого они изготовлены. Выбор материала напрямую влияет на целый ряд характеристик. Рассмотрим основные аспекты:

1. Эффективность (КПД).

Материалы с низкой магнитной проницаемостью, низкой удельной электрической проводимостью и высоким гистерезисом приводят к высоким потерям энергии в виде тепла, снижая КПД. Наоборот, материалы с высокими электромагнитными свойствами повышают КПД.

2. Максимальная частота вращения и мощность.

Роторы, особенно высокоскоростные, подвергаются огромным центробежным нагрузкам. Материалы с высокой прочностью позволяют работать на гораздо более высоких оборотах, что напрямую связано с увеличением мощности. Материалы с низкой плотностью, такие как алюминий, титановые сплавы, композиты уменьшают инерцию ротора и центробежные напряжения при заданной скорости, позволяя достигать более высоких оборотов или снижать вес конструкции. [2]

3. Рабочий ресурс и надежность.

Роторы подвергаются циклическим нагрузкам. Материалы с высокой усталостной прочностью, такие как специальные стальные сплавы, никелевые суперсплавы обеспечивают длительный срок службы без разрушения от циклической нагрузки [4]. В роторах, подверженных абразивному износу, материалы с высокой твердостью и износостойкостью увеличивают срок службы. [2]

4. Вибрация и стабильность.

Материалы с высокой жесткостью помогают уменьшить деформации и вибрации ротора, что очень важно для высокоскоростных машин. [4]

5. Температурный режим.

Материалы с хорошей теплопроводностью способствуют отводу тепла, что важно для электрических машин и предотвращает перегрев. В то же время в некоторых случаях может потребоваться низкая теплопроводность для изоляции [4].

1.3. Неодимовые и самарий-кобальтовые магниты в роторах электрических машин

Неодимовые магниты (приложение 3 рис. 1) и самарий-кобальтовые магниты (приложение 4 рис. 1) применяются в разных случаях. Выбор материала зависит от конкретных потребностей.

Неодимовые магниты представляют собой сплав неодима, железа и бора (NdFeB) и являются самыми мощными постоянными магнитами на сегодняшний день.

Основные свойства:

- высокая магнитная индукция и энергия;
- высокая коэрцитивная сила (устойчивость к размагничиванию);
- сравнительно низкая рабочая температура.

Неодимовые магниты широко используются в:

- тяговых электродвигателях (электромобили);
- генераторах;
- бесщёточных двигателях.

Их высокая магнитная энергия позволяет создавать компактные и лёгкие роторы с высокой мощностью.

Недостатки:

- чувствительность к коррозии (требуется защитное покрытие);
- ухудшение свойств при высоких температурах.

Самарий-кобальтовые магниты изготавливаются из сплава самария и кобальта (SmCo).

Основные свойства:

- высокая устойчивость к размагничиванию;
- высокая рабочая температура (до 250–350 °С);
- высокая коррозионная стойкость.

Самарий-кобальтовые магниты широко используются в:

- высокотемпературных двигателях;
- авиационных и космических установках;
- генераторах, работающих в тяжёлых условиях.

Недостатки:

- более высокая стоимость;
- меньшая магнитная энергия по сравнению с NdFeB.

1.4. Динамическая балансировка роторов для современных машин с высокой частотой вращения.

Динамическая балансировка необходима для балансировки роторов электрических машин с высокой частотой вращения (например, роторов электродвигателей, валов центробежных насосов, роторов турбокомпрессоров). Это метод устранения дисбаланса – смещения масс относительно оси вращения, которое проявляется в виде вибрации и износа подшипников.

Цель балансировки – снизить дисбаланс, остаточное значение которого при любой частоте вращения не должно вызывать превышения допустимых уровней вибрации машин и динамического прогиба ротора. [3]

Динамическая балансировка основана на **измерении вибраций, возникающих при вращении ротора**. Современные балансировочные станки оснащены датчиками, которые фиксируют амплитуду и фазу вибраций на каждой опоре вала. Эти данные используются для расчёта необходимых корректирующих масс и их расположения (Приложение 5 рис. 1).

Балансировка роторов направлена на устранение неуравновешенности и снижение вибраций при вращении. В зависимости от конструкции ротора, скорости вращения и требований к точности применяются различные методы. [3]

По количеству плоскостей коррекции:

- одноплоскостная (статическая) балансировка, применяется для коротких роторов (диски, вентиляторы);

– двухплоскостная (динамическая) балансировка, коррекция выполняется в двух плоскостях (например, с двух сторон ротора).

По способу определения дисбаланса:

– метод пробных грузов (на ротор устанавливается пробный груз, измеряется изменение вибрации, рассчитывается корректирующая масса);

– векторный метод;

– метод коэффициентов влияния.

По способу коррекции массы:

– удаление массы (сверлением или фрезерованием);

– добавление массы (установка грузов, винтовые корректоры);

– перераспределение массы (поворот элементов, балансировочные кольца).

Глава 2. Технологии изготовления роторов

2.1. Способы установки магнитов на роторах

В электрических машинах с постоянными магнитами конструкция ротора и способ размещения магнитов оказывают существенное влияние на электромагнитные и механические характеристики. Наиболее распространёнными являются два принципиально различных способа установки магнитов: поверхностный и встроенный. Каждый из них имеет свои особенности, преимущества и ограничения, что определяет область их применения.

При поверхностной установке магниты размещаются непосредственно на внешней поверхности ротора и, как правило, имеют форму дуговых сегментов, соответствующих окружности машины. Они крепятся с помощью клеевых соединений и композитных бандажей, предотвращающих их отрыв под действием центробежных сил. Такой способ отличается конструктивной простотой и технологичностью изготовления, поскольку не требует сложной механической обработки ротора. Благодаря расположению магнитов на поверхности достигается высокий уровень магнитной индукции в воздушном зазоре, что положительно сказывается на энергетических характеристиках машины и её коэффициенте полезного действия.

Однако поверхностное размещение магнитов имеет ряд ограничений, связанных прежде всего с механической прочностью конструкции. При увеличении скорости вращения существенно возрастают центробежные силы, действующие на магниты, что требует применения дополнительных средств крепления и может ограничивать максимально допустимую частоту вращения. Также существует риск механического повреждения или отрыва магнитов при экстремальных режимах работы.

Встроенная установка магнитов предполагает их размещение внутри ротора в специально выполненных пазах или полостях. Магниты могут располагаться различным образом – например, в виде V-образных, U-образных или прямолинейных конфигураций, что позволяет оптимизировать распределение магнитного поля и механические свойства ротора. Такая конструкция обеспечивает значительно более высокую механическую

прочность, поскольку магниты защищены от прямого воздействия центробежных сил массивом ротора. Это позволяет использовать встроенные магниты в высокоскоростных электрических машинах, включая тяговые двигатели электромобилей и авиационные приводы.

Таким образом, выбор способа установки магнитов определяется совокупностью требований к электрической машине, включая скорость вращения, условия эксплуатации, требования к надёжности и стоимости. Поверхностная установка обеспечивает простоту и высокую магнитную эффективность, тогда как встроенная конструкция позволяет достичь высокой механической прочности и расширенных функциональных возможностей, что делает её предпочтительной для современных высокоскоростных и высоконагруженных электрических приводов.

2.2. Методы фиксации постоянных магнитов

Современные электрические машины с постоянными магнитами предъявляют высокие требования к конструкции и технологии изготовления роторов. Особое значение имеют методы фиксации магнитов, технологии бандажирования и способы их установки в пазы, поскольку именно эти элементы определяют механическую прочность, надёжность и долговечность работы машины при высоких скоростях вращения.

Одним из наиболее распространённых способов фиксации магнитов, особенно в роторах с поверхностным расположением, является применение клеевых соединений. Клеевой слой выполняет не только функцию механического крепления, но и играет роль демпфирующего элемента, снижающего вибрационные нагрузки. В отечественной практике традиционно используются эпоксидные компаунды горячего отверждения, отличающиеся высокой прочностью, однако требующие длительного технологического цикла. В то же время зарубежные производители всё чаще применяют анаэробные и модифицированные акриловые клеевые составы, обеспечивающие более быстрое отверждение. Ключевым фактором, определяющим надёжность клеевого соединения, является подготовка поверхности. Несмотря на высокую эффективность клеевых соединений, их существенным недостатком является склонность к старению под воздействием температурных циклов и центробежных сил, что требует дополнительного применения механических средств фиксации, прежде всего бандажей[5].

Бандажирование является важнейшим элементом конструкции роторов с поверхностными магнитами, так как оно обеспечивает компенсацию растягивающих усилий, возникающих при вращении. Наиболее современным и эффективным решением считаются углеволоконные бандажи, широко применяемые в высокоскоростных электрических машинах. Технология их изготовления основана на намотке углеродного волокна с заданным натяжением, при этом особое внимание уделяется равномерности распределения усилий. В современных промышленных решениях используются автоматизированные системы контроля натяжения нити, что позволяет обеспечить высокую точность и повторяемость процесса. В машинах средней мощности часто применяются

металлические гильзы, изготовленные из немагнитных материалов, таких как нержавеющая сталь, титан или жаропрочные сплавы. Одним из распространённых методов их установки является горячая посадка, при которой гильза нагревается, а ротор охлаждается, что обеспечивает плотное соединение за счёт разности температур. Однако использование металлических элементов требует учёта дополнительных потерь от вихревых токов. В качестве более экономичного решения применяются стекловолоконные бандажки, которые уступают углеволоконным по прочности, но обеспечивают приемлемые характеристики.

В последние годы наблюдается активное развитие технологий роторов с внутренним расположением магнитов, что связано с необходимостью повышения механической прочности и расширения диапазона рабочих скоростей. В таких конструкциях магниты устанавливаются в пазы ротора и фиксируются преимущественно за счёт геометрии самих пазов. Наиболее распространёнными являются формы типа «ласточкин хвост» или прямоугольные карманы, обеспечивающие надёжное удержание магнитов при действии центробежных сил. [5]

Сравнение отечественных и зарубежных подходов показывает наличие определённых различий в приоритетах развития технологий. Зарубежные производители, особенно в Европе, США и Китае, ориентируются на автоматизацию производственных процессов, применение высокопрочных композитных материалов и внедрение аддитивных технологий. Значительное внимание уделяется сегментации магнитов для снижения вихревых токов и повышения эффективности. В отечественной практике традиционно сильны позиции в области теоретического моделирования и расчёта электромагнитных и механических процессов. Основной акцент делается на обеспечении надёжности работы в сложных условиях эксплуатации, разработке новых магнитных материалов и создании технологий, направленных на снижение зависимости от импортных компонентов.

Таким образом, технологии изготовления роторов с постоянными магнитами представляют собой комплекс взаимосвязанных решений, включающих клеевые соединения, бандажирование и методы установки магнитов. Их выбор определяется требованиями к конкретной электрической машине и условиями её эксплуатации, при этом современные тенденции направлены на повышение надёжности, автоматизацию производства и использование новых материалов [5].

2.3. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков роторов с поверхностным и внутренним расположением постоянных магнитов

В электрических машинах с постоянными магнитами конструкция ротора и способ размещения магнитов оказывают определяющее влияние на их характеристики. Наиболее распространёнными являются роторы с поверхностным и внутренним расположением магнитов. Эти конструкции имеют принципиальные различия, которые проявляются в их механических, электромагнитных и технологических свойствах.

Сравнительные характеристики данных типов роторов представлены в таблице

Параметр	Ротор с поверхностными магнитами	Ротор с внутренними магнитами
Конструкция	Простая, магниты расположены на поверхности	Более сложная, магниты встроены в пазы
Технологичность изготовления	Высокая, простая сборка	Ниже, требуется высокая точность
КПД	Высокий	Высокий
Механическая прочность	Ограниченная	Высокая
Работа на высоких скоростях	Ограничена	Возможна при высоких оборотах
Необходимость бандажирования	Обычно требуется	Не требуется
Потери в стали ротора	Низкие	Выше
Управляемость	Средняя	Высокая
Стоимость	Ниже	Выше
Охлаждение магнитов	Эффективное	Затруднённое
Область применения	Электромобили, авиация	Электромобили, авиация, высокоскоростные приводы

Таким образом, роторы с поверхностными магнитами отличаются простотой конструкции, однако уступают по механической прочности. В свою очередь, роторы с внутренними магнитами обеспечивают более высокую надёжность и расширенные функциональные возможности, что делает их предпочтительными для современных высокоскоростных и высоконагруженных электрических машин.

Заключение

В рамках данного индивидуального проекта был проведен детальный анализ конструктивных особенностей роторов ЭМПМ, рассмотрены современные методы их изготовления и оценены ключевые факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики.

Проведенный сравнительный анализ типов роторов с поверхностным (SPM) и внутренним (IPM) расположением магнитов показал, что выбор конфигурации оказывает существенное влияние на магнитную индукцию в воздушном зазоре и устойчивость к центробежным нагрузкам. Роторы с внутренним расположением магнитов демонстрируют наилучшее сочетание прочности и эффективности для высокомоментных и высокоскоростных применений, таких как тяговые двигатели электромобилей, обеспечивая лучшую защиту магнитов и расширенный диапазон рабочих скоростей. В то же время, поверхностные расположения магнитов остаются технологически проще и экономичнее для серийного производства, хотя и имеют ограничения по механической прочности при высоких оборотах.

Анализ материалов постоянных магнитов, таких как NdFeB и SmCo, выявил их специфические преимущества и области применения. NdFeB магниты обеспечивают высокую плотность магнитного потока и оптимальны для массовых электродвигателей, но требуют защиты от коррозии и высоких температур. SmCo магниты, несмотря на более высокую стоимость и меньшую удельную магнитную энергию, предпочтительны в условиях высоких рабочих температур (до 350°C) и при повышенных требованиях к стабильности магнитных свойств, что делает их незаменимыми в авиационных, космических и других экстремальных применениях.

Технологии фиксации магнитов, включая клеевые соединения (с применением современных анаэробных и акриловых составов), бандажирование (с использованием высокопрочных углеволоконных лент или металлических гильз) и установку в пазы, были проанализированы с точки зрения обеспечения механической надежности. Было установлено, что для высокоскоростных машин критически важно применение комплексных решений, сочетающих прочные клеевые соединения с надежным бандажированием. Особое внимание было уделено вопросам динамической балансировки роторов, которая является неотъемлемым этапом производства для обеспечения долговечности и снижения вибраций, особенно в машинах с высокой частотой вращения.

Таким образом, создание ротора ЭМПМ представляет собой комплексную инженерную задачу, требующую тщательного учета взаимосвязи между электромагнитными характеристиками, механической прочностью, температурными режимами, надежностью и экономической целесообразностью. Современные технологические тенденции, направленные на повышение надежности, эффективности и расширение функциональных возможностей ЭМПМ, подтверждают их растущую актуальность и перспективность для дальнейшего развития в различных отраслях промышленности.

Список литературы:

1. Вавилов Вячеслав Евгеньевич. Способ изготовления ротора с постоянными магнитами – 2022/ [электронный ресурс]. – режим доступа: <https://rosstip.ru/patents/65437-sposob-izgotovleniya-rotora-s-postoyannymi-magnitami>
2. Попов В.И. Высокоэффективные электрические машины с постоянными магнитами – 2021/ [электронный ресурс]. – режим доступа: <https://inner.su/articles/dvigateli-s-postoyannymi-magnitami/?ysclid=mgjaqvr13d41877577>
3. Петров Т.Н. Технология мелкосерийного производства электродвигателей – 2025/ [электронный ресурс]. – режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/949110/?ysclid=mgjauori2f739117831>
4. Русланов А.П. Аддитивные технологии производства деталей электрических машин – 2023 / [электронный ресурс]. – режим доступа: <https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/2768-additivnoe-proizvodstvo-elektricheskikh-mashin.html?ysclid=mgjb4giwpb974263337>

5. НОМРАИТ Технология мелкосерийного производства электродвигателей – 2025 [электронный ресурс]. – режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/949110/?ysclid=mgjauori2f739117831>

Приложение 1



Рис. 1. Конструкция электродвигателя с постоянными магнитами

Приложение 2



Рис. 1. Электрическая машина для привода электромобиля



Рис. 1. Неодимовый магнит (NdFeB)



Рис. 1. Самарий-кобальтовый магнит (SmCo)

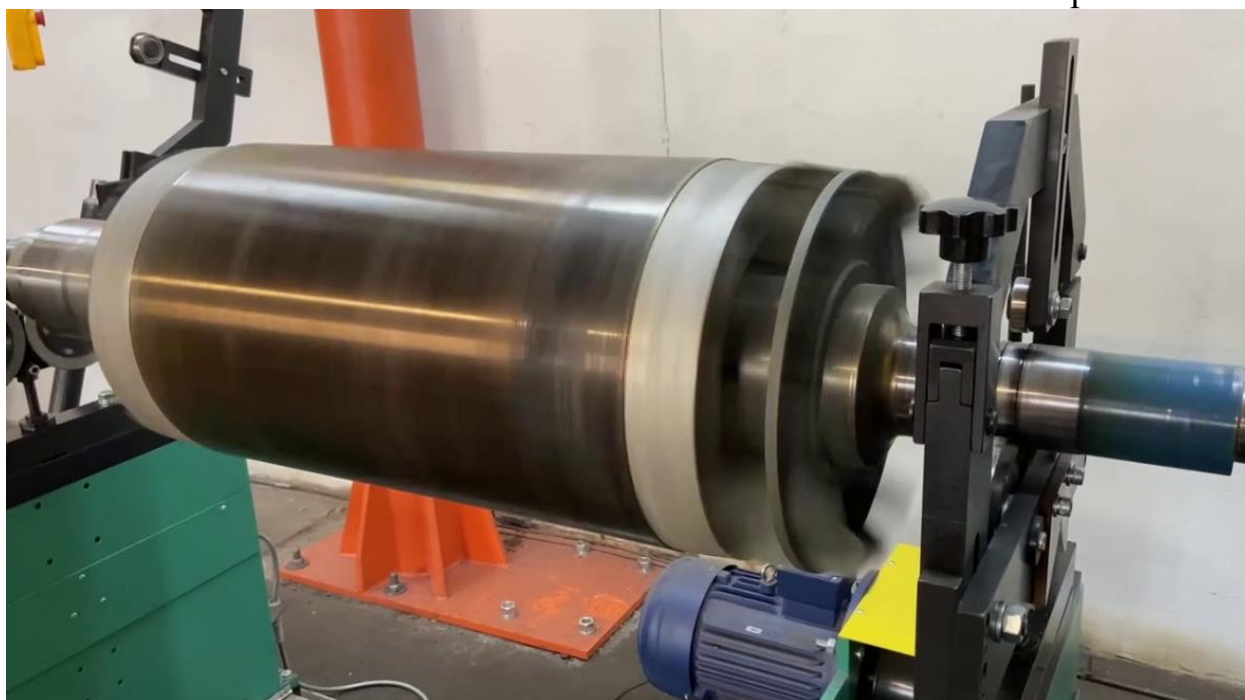


Рис. 1. Процесс балансировки ротора

Система охлаждения электрических машин в авиации

Дорофеева Е.А.

МАОУ Лицей № 155 им. Героя Советского Союза Н.В. Ковшовой

Введение

Актуальность данной темы обусловлена постоянным ростом мощности электрических машин и уменьшением их габаритов, а также ужесточением требований к их коэффициенту полезного действия (КПД) и общей надежности [1].

Целью проекта является анализ современных систем охлаждения и нахождение новых способов для решения проблемы с нагревом электрических машин.

Для достижения этой цели необходимо решить ряд задач:

- изучение видов тепловых потерь в электрических машинах;
- анализ классификации и принципов действия различных систем охлаждения, сравнение их эффективности.

Практическая часть представляет собой анализ систем охлаждения в авиации на примере генератора и двигателя.

В качестве объекта исследования рассматриваются системы охлаждения электрических машин, а предметом исследования служит эффективность отвода тепла в этих системах.

Глава 1. Источники тепла и принципы теплоотвода в электрических машинах.

Электродвигатель – это устройство, которое превращает электрическую энергию в механическую. Такая трансформация не может происходить без потерь. Потерями принято считать ту энергию, которая пошла на нагрев. Для того, чтобы двигатель работал долго и исправно необходимо искать пути отвода этого тепла. В этой главе я подробно разберу, откуда это тепло берётся, к каким проблемам ведёт и как его можно отвести от рабочих частей машины.

1.1. Основные источники тепла в электрических машинах

Чтобы понять, как бороться с нагревом, нужно сначала узнать его причины. Внутри работающего двигателя тепло генерируется сразу в нескольких зонах:

- Электрические потери в обмотках. Медные провода, которые состоят из обмотки статора и ротора, обладают электрическим сопротивлением. При прохождении тока через сопротивление часть вырабатываемой энергии превращается в тепловую. Это можно сравнить с работой нагревательного прибора: чем больше ток, тем сильнее нагрев. В мощных двигателях под нагрузкой эти потери становятся основным источником тепла.

- Магнитные потери в сердечнике. Сердечник – это набор тонких пластин, на который наматывается обмотка. Его задача – проводить магнитный поток. Однако при быстром перемагничивании (в сети переменного тока направление магнитного поля меняется 50 раз в секунду) в стали возникают вихревые токи. В металле наводится небольшой электрический ток, который тратит энергию на нагрев, чтобы уменьшить эти токи, сердечник изготавливают не цельным, а изолированным друг от друга пластин.

- Механические потери. Любая движущаяся часть двигателя имеет трение, которое в свою очередь приводит к нагреву. Также существуют вентиляционные потери – сопротивление воздуха, который противодействует движению двигателя. Чем выше скорость вращения, тем больше эти потери.

Таким образом эти три пункта формируют то общее количество энергии, которое система охлаждения и должна рассеять, чтобы температура внутри двигателя оставалась в безопасных пределах [1].

1.2. Последствия перегрева для работы и ресурса двигателя

Во время работы электродвигателя выделяется тепло. В нормальном режиме система охлаждения успевает отвести тепло, но, если двигатель перегружен или охлаждение работает плохо, начинается перегрев. Это состояние, когда температура внутри двигателя становится выше допустимой нормы. Перегрев не проходит бесследно, он вызывает ряд серьезных проблем, которые в итоге приводят к выходу двигателя из строя.

- Разрушение изоляции проводов от высокой температуры. Все провода в обмотке покрыты слоем изоляции – специальным лаком, пленкой или тканью. У каждого типа изоляции есть свой класс – Y, A, E, B, F, H, C, они различаются температурой, которую они способны выдержать (таблица классов изоляции представлена в приложении 1). При постоянном перегреве изоляции становится

хрупкой и начинает трескаться, теряет свои диэлектрические (изолирующие) свойства. В результате там, где изоляция истончилась или потрескалась, может произойти короткое замыкание. Это приводит к «сгоранию» двигателя и требует дорогостоящего ремонта [2]

- Снижение КПД и расход электроэнергии. Это происходит из-за физического закона: сопротивление металла увеличивается с ростом температуры. Обмотки сделаны из меди. Чем горячее медь, тем выше сопротивление. Происходит замкнутое действие: двигатель нагревается, сопротивление обмоток, вместе с ним по закону Джоуля-Ленца потери тока становятся больше, эти потери снова превращаются в тепло – температура становится выше. В итоге все больше потребляемой из сети энергии тратится не на создание вращения, а на нагрев. Его полезная мощность и КПД двигателя падают.

- Износ механических частей. В подшипниках есть смазка, которая при перегреве может высохнуть или стечь. Без нее подшипники начинают тереться, перегреваться и быстро выходить из строя. Не мало важно и то, что детали: корпус, вал, обмотки и сердечник сделаны из разных материалов (алюминия, стали, меди). У каждого металла свой коэффициент теплового расширения – это то, насколько он увеличивается при нагреве. Это создает внутренние напряжения, которые могут привести к деформациям и нарушению состояния деталей [3].

1.3. Физические механизмы отвода тепла от активных частей

Для отвода тепла от нагретых деталей к окружающей среде используются три основных физических механизма теплопередачи, которые работают повсеместно:

- Теплопроводность – этот механизм отвечает за передачу тепла внутри твердых деталей двигателя. Тепло от обмоток передается к сердечнику, от сердечника к корпусу, и от корпусных деталей к внешним теплоотводящим поверхностям. Эффективность этого процесса зависит от теплопроводности материалов, чем она выше, тем лучше передаётся тепло [2].

- Конвекция – наиболее важный для охлаждения механизм. Конвекция обеспечивает передачу тепла от поверхности двигателя к окружающей среде. Есть два вида конвекции: естественная, когда движение среды происходит за счёт разности плотностей нагретых холодных слоев; принудительная, когда движение среды создаётся искусственно с помощью вентиляторов и насосов. Она позволяет многократно увеличить эффективность теплоотдачи.

- Тепловое излучение – нагретые тела излучают электромагнитные волны в инфракрасном диапазоне. Хотя доля тепла, отводимого излучением, обычно не превышает 5-10% от общего теплообмена, но в некоторых случаях этот механизм может играть значительную роль.

В реальных системах охлаждения все три механизма работают совместно: тепло передаётся от внутренних деталей к корпусу за счёт теплопроводности, а от корпуса в окружающую среду – преимущественно за счёт конвекции, с небольшим вкладом излучения.

1.4. Заключение по главе 1

Понимание источников тепловыделения, последствий перегрева и механизмов теплоотвода составляет теоретическую основу для понимания различий систем охлаждения. Во второй главе я подробно классифицирую системы охлаждения и более подробно разберу системы охлаждения электрических машин в авиации на конкретных примерах.

Глава 2. Анализ систем охлаждения в авиастроении

Системы охлаждения в авиастроении критически важны для поддержания работоспособности бортового оборудования, двигателей и комфорта экипажа/пассажиров, функционируя в условиях высоких скоростей и перепадов температур. Для обеспечения работоспособности силовой установки необходимо поддерживать вполне определенную ее температуру. Превышение этой температуры может привести к перегреву двигателя, его агрегатов и элементов конструкции летательного аппарата, расположенных в зоне двигателя. Перегрев жизненно важных узлов двигателя (камеры сгорания, турбины и т. д.) снижает их прочность или вызывает разрушение. Поэтому от горячих деталей двигателя необходим либо отвод тепла в менее нагретые детали, либо контакт их с охладителем. Охлаждение отдельных элементов двигателя (например, лопаток и дисков турбины) производится также с целью замены дорогостоящих высоколегированных сталей и сплавов более дешевыми, уменьшения термических напряжений за счет выравнивания температуры детали по объему, повышения температуры газов перед турбиной. В зависимости от типа силовой установки охлаждение может быть осуществлено различно. В современных поршневых двигателях (ПД), например, цилиндры обдуваются набегающим потоком воздуха. Передача тепла от горячих деталей двигателя может осуществляться при помощи промежуточной среды (воды, масла, топлива), которая играет роль охладителя. В этом случае тепло в окружающую среду рассеивается через радиаторные установки. Кроме силовой установки, на летательном аппарате необходимо охлаждать некоторые агрегаты, которые сами выделяют тепло (генераторы, компрессоры, насосы, электрические преобразователи).

Необходимость создания нормальных физиологических условий для экипажа и пассажиров на больших высотах полета приводит к использованию для наддува кабин воздуха, забираемого от компрессора газотурбинного двигателя (ГТД).

Это возможно только при наличии специальной системы охлаждения, обеспечивающей понижение температуры воздуха и поддержание ее постоянной в заданном диапазоне температур. Увеличение скорости полета повышает температуру поверхности летательного аппарата. Нагрев конструкции ухудшает прочностные характеристики материалов. Раньше всего выходят из строя элементы конструкции, выполненные из органических материалов. Значительное увеличение температуры может привести к закипанию топлива в баках, потере электроизолирующих свойств резины. В связи с этим встает вопрос о выборе новых материалов, которые могут работать при высоких температурах.

Силовая установка на больших скоростях полета нагревается до более высоких температур, чем наружные поверхности летательного аппарата, так как к теплу, получаемому от заторможенного потока, прибавляется тепло, передаваемое от двигателя и его оборудования. В этих условиях нужны специальные системы охлаждения, обеспечивающие поддержание температуры отдельных частей силовой установки в заданных пределах.

Таким образом, системы охлаждения силовых установок предназначены для поддержания температуры отдельных агрегатов и систем в допустимых по техническим условиям пределах; вентиляции подкапотного пространства двигателя с целью ликвидации там застойных зон горячего воздуха и предотвращения скопления в гондолах паров пожаро- и взрывоопасных жидкостей; защиты элементов конструкции летательного аппарата и его систем от теплового излучения двигателя.

К системам охлаждения силовых установок предъявляются следующие требования: высокая эффективность, т. е. обеспечение необходимого отвода тепла от двигателя и его элементов (деталей, агрегатов и узлов) при малом расходе охладителя и небольших затратах мощности на работу охлаждающих устройств; простота конструкции; небольшой вес; надежное и простое, желательно автоматическое управление; простота эксплуатации (минимальное время на подготовку к полету, удобство осмотра, монтажа, демонтажа и т. п.).

2.1. Классификация и особенности систем охлаждения

Системы охлаждения по типу применяемого охладителя подразделяются на две группы: воздушные (газовые) и жидкостные. В первой группе используется атмосферный воздух или пары воды, во второй – топливо, масло, жидкости с высокой температурой кипения. Вещество-охладитель должно иметь высокие значения удельной теплоемкости, коэффициента теплоотдачи и температуры кипения, сохранять физические свойства при многократных нагревах и охлаждениях, быть безопасным и быть простым в обслуживании.

-Воздушные (газовые) применяются для защиты от перегрева компрессоров, генераторов, цилиндров ПД, камер сгорания, удлинительных труб, дисков и лопаток турбин ГТД. Эти системы наиболее просты по конструкции, не требуют сложных дополнительных устройств, надежны в работе. Отвод тепла от нагретых деталей воздухом производится двумя способами: либо путем обдува их наружных поверхностей (внешнее охлаждение), либо за счет циркуляции охладителя внутри деталей (внутреннее охлаждение). Первый способ обычно используют для снижения температуры агрегатов, расположенных на двигателе (компрессоры, насосы, генераторы), или деталей, которые не омываются газовым потоком, второй – для деталей, находящихся в газовом потоке. Для уменьшения температуры стенок камеры сгорания и дисков турбины широкое распространение получило заградительное охлаждение. В этом случае через отверстия или щели по направлению потока горячего газа подается струя холодного воздуха, которая, перемешиваясь с горячим газом, понижает его температуру, предохраняя тем самым защищаемые поверхности от перегрева. Для подачи холодного воздуха через щель не

требуется большого перепада давления и обычно используется воздух, отбираемый из атмосферы.

ПД охлаждается за счёт встречного потока воздуха, который обдувает его ребристые стенки. Чтобы охлаждение работало лучше, двигатель устанавливают в мотогондоле (отсеке летательного аппарата, где установлен двигатель) и добавляют дефлекторы – они направляют воздух прямо к стенкам, и его требуется меньше. Края дефлекторов закрывают кожей или пластиком, чтобы воздух не утекал в стороны. А температуру деталей регулируют, делая выходное отверстие для воздуха шире или уже – например, при смене режима полёта. Так конструкция получается компактнее и надёжнее.

-Жидкостные используют в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД), чтобы не дать стенкам камер сгорания перегреться. На некоторых летательных аппаратах с турбореактивными двигателями (ТРД) такие системы охлаждают ещё и масло в радиаторах.

Часто в качестве охладителя выступает само топливо – но только если между ним и горячими стенками камеры сгорания есть достаточный перепад температур. При этом важно, чтобы топливо не нагревалось слишком сильно: иначе оно начнет коксоваться (образовывать отложения).

При больших тепловых нагрузках охладить камеру снаружи бывает сложно: температура внутри и снаружи стенки сильно различается. Если использовать в качестве охладителя горючее, его может не хватить, чтобы забрать всё тепло. К тому же отдельные участки стенки могут перегреться, если охладитель начнёт закипать в каком-то месте.

В таких случаях применяют плёночное охлаждение: через небольшие отверстия или щели подают жидкость, которая образует на поверхности защитную плёнку. Эта плёнка уносится потоком газа вдоль стенки и испаряется – забирая с собой тепло. Пары жидкости попадают в пограничный слой, делают его толще и снижают теплоотдачу в стенки.

Есть ещё пористое охлаждение – когда жидкость или газ подают через пористую либо перфорированную поверхность прямо в пограничный слой. У этого способа расход охладителя меньше, но есть сложности: нужен специальный пористый материал – он менее прочен, чем обычный; при охлаждении сопел реактивных двигателей может снижаться тяга; чтобы подавать охладитель через пористую поверхность, нужно поддерживать запас давления.

2.2. Сравнительная оценка эффективности различных систем

Данная таблица демонстрирует характеристику двух систем охлаждения: воздушной и жидкостной, на ее примере можно увидеть, как положительные, так и отрицательные стороны каждой из систем [4].

Таблица

Параметр сравнения	Жидкостная система охлаждения	Воздушная система охлаждения
Принцип работы	Тепло передаётся от двигателя через жидкость (обычно воду или антифриз) к радиатору, где охлаждается воздухом	Горячие части двигателя охлаждаются непосредственно потоком воздуха
Эффективность охлаждения	Высокая, позволяет поддерживать стабильную температуру двигателя	Менее эффективна, зависит от скорости и температуры воздуха
Сложность конструкции	Более сложная, включает насосы, радиаторы, трубопроводы, резервуары	Проще, нет необходимости в дополнительных компонентах
Масса системы	Большая масса из-за жидкости и дополнительного оборудования	Меньше масса, так как отсутствуют насосы и жидкость
Обслуживание	Требует контроля уровня и состояния жидкости, очистки радиаторов	Меньше требований по техническому обслуживанию
Применение	Чаще используется в более мощных двигателях и больших самолётах, где нужна высокая теплоотдача	Часто применяется в лёгких самолётах, мотоциклетных двигателях, небольших беспилотниках
Температурный диапазон	Может обеспечить точный контроль температуры двигателя, подходит для различных условий	Менее гибкая в контроле температуры, охлаждение зависит от внешних условий
Надежность	Потенциально риск утечек жидкости, поломки насосов	Обычно надёжнее за счёт меньшего числа компонентов
Стоимость	Дороже из-за дополнительного оборудования и монтажа	Дешевле и проще в эксплуатации

2.3. Обзор электрических машин в авиации

Электрические машины – ключевой элемент систем электроснабжения летательных аппаратов: они обеспечивают преобразование энергии и питание бортового оборудования, от которого напрямую зависят безопасность и функциональность воздушного судна.

Эти устройства выполняют несколько критически важных функций на борту. Прежде всего, они отвечают за генерацию электроэнергии для питания всех бортовых систем. Кроме того, электрические машины задействуются для привода разнообразных механизмов: например, насосов гидросистем, вентиляторов систем кондиционирования, приводов шасси и рулевых приводов.

Ещё одна значимая задача – запуск двигателей: во многих современных авиадвигателях применяются электрические стартер-генераторы. Наконец, электрические машины обеспечивают работу систем жизнеобеспечения и климат-контроля, включая вентиляцию и кондиционирование салона.

В авиации используются разные типы электрических машин – каждый со своей спецификой и областью применения:

- Генераторы переменного тока обеспечивают основное электроснабжение летательного аппарата. Особенно широко распространены синхронные генераторы: их ценят за надёжность и способность стабильно работать в широком диапазоне нагрузок

- Генераторы постоянного тока задействуются в вспомогательных системах и служат для питания оборудования, которому требуется постоянное напряжение.

- Электродвигатели применяют для привода самых разных механизмов – насосов, вентиляторов, компрессоров и элементов управления.

- Трансформаторы необходимы для преобразования напряжения в бортовой сети: благодаря им оборудование получает питание с оптимальными параметрами.

- Электромашинные преобразователи представляют собой специальные агрегаты, в которых электродвигатель постоянного тока и генератор переменного тока (а иногда и два генератора) механически закреплены на одном валу. Такие устройства позволяют преобразовывать один вид электрической энергии в другой, обеспечивая гибкость и адаптивность бортовой энергосистемы. [5].

2.4. Система охлаждения авиационного генератора

Во время работы генератора его обмотки и активная сталь нагреваются. Допустимые температуры нагрева обмоток статора и ротора генератора зависят, в первую очередь, от применяемых изоляционных материалов и температуры охлаждающей среды. Так, например, для изоляции класса В допустимая температура нагрева обмотки статора генератора должна находиться в пределах 105 °С, а ротора – 130 °С. При более теплостойкой изоляции обмоток статора и ротора, например, классов F и H, пределы допустимой температуры нагрева увеличиваются до 155 °С и 180 °С соответственно, класс изоляции С допускает температуру нагрева обмоток свыше 180°С.

В процессе эксплуатации генераторов изоляция обмоток постепенно стареет. Причиной этого являются загрязнение, увлажнение, окисление кислородом воздуха, воздействие электрического поля и электрических нагрузок и т. д. Однако главной причиной старения изоляции является ее нагрев. Чем выше температура нагрева изоляции, тем быстрее она изнашивается, тем меньше срок ее службы. Срок службы изоляции класса В при температуре нагрева ее до 120 °С составляет около 15 лет, а при нагреве до 140 °С – сокращается почти до 2 лет. Та же изоляция при температуре нагрева 105 °С стареет значительно медленнее и срок службы ее увеличивается до 30 лет. Поэтому во время эксплуатации при любых режимах работы генератора нельзя допускать нагрева

его обмоток и внутренних частей свыше допустимых температур. Для того чтобы температура нагрева не превышала допустимых значений, все генераторы выполняют с искусственным охлаждением. При более интенсивном отводе тепла (зависит от типа хладагента) мощность, которую может отдать генератор без ухудшения свойств изоляции, увеличивается. Для авиационных генераторов воздушных судов, летающих на высотах 10–12 км со скоростями не более 1 000 км/час применяются следующие системы охлаждения генераторов: самовентиляция (схема самовентиляции представлена в приложении 2, рис. 1); продув забортного воздуха (схема продува забортного воздуха представлена в приложении 2, рис. 2); жидкостные (схема жидкостного охлаждения генератора представлена в приложении 2, рис. 3) и комбинированные системы (схема комбинированного охлаждения представлена в приложении 2, рис. 4).

- Самовентиляция осуществляется воздухом, подаваемым вентилятором, насаженным на вал генератора. Вентилятор прогоняет по внутренним каналам генератора воздух, являющийся теплоносителем. Этот способ охлаждения весьма прост, но малоэффективен и применим для генераторов малой мощности (1–1,5 кВт) при незначительных высотах полета до высоты 4 км) летательных аппаратов (вертолеты, легкие транспортные самолеты).

- Принудительное охлаждение (используется для более мощных двигателей) потоком встречного воздуха (продув). Охлаждающий воздух, попадающий в генератор, обтекает нагретые части ротора, статора и обмоток, отбирает у них выделяемое тепло и уносит его за пределы генератора (схема принудительного охлаждения представлена в приложении 2). Таким образом охлаждаются в полете все генераторы самолетов и вертолетов с дозвуковыми скоростями полета. Принудительная система охлаждения продувом встречного потока воздуха эффективна только до высот полета порядка 20 000 метров. Дело в том, что с увеличением высоты (до 12–15 км) и скорости полета (не более 1 000 км/час) воздушных судов интенсивность охлаждения уменьшается из-за изменения параметров атмосферы, потом с увеличением высоты и скорости такой способ охлаждения становится непригодным для охлаждения. В процессе полета, с ростом высоты плотность воздуха уменьшается, это ухудшает охлаждение электрической машины (генератора) из-за уменьшения коэффициента конвекционной теплоотдачи и весового количества охлаждающего воздуха (уменьшение расхода воздуха), проходящего через машину в случае принудительной вентиляции.

Таким образом, снижение температуры и уменьшение плотности воздуха с высотой полета действуют в противоположных направлениях, и, в конечном счете, влияние высоты на условия охлаждения электрической машины зависит от того, какой из этих факторов преобладает.

- Продув с самовентиляцией является совокупностью двух способов охлаждения: самовентиляции и продува и широко применяется на конкретных типах воздушных судов. Установка на валу генератора вентилятора позволяет частично нагружать генератор (20–30% от номинальной мощности) в наземных условиях, когда отсутствует продув (напор встречного воздуха). Именно такая

система охлаждения чаще применяется для охлаждения генераторов на вертолетах и дозвуковых самолетах. В связи с тем, что увеличение высоты и скорости полета накладывает предел применения охлаждения продувом встречного потока воздуха, разработан ряд более эффективных систем охлаждения авиационных генераторов: жидкостные (путем испарения жидкости на активных частях генератора); масляные; дисперсно-испарительные и другие. Уменьшение интенсивности охлаждения с увеличением скорости полета, объясняется повышением температуры охлаждающего воздуха в результате его торможения в вентиляционной системе генератора.

- Чтобы уменьшить массу и габариты систем охлаждения на самолетах применяют комбинированные испарительные системы охлаждения, представляющие собой совокупность воздушной и испарительной систем охлаждения (схема комбинированной системы охлаждения представлена в приложении 3). В этой системе на малых высотах и скоростях полета охлаждение машин осуществляется продувом забортного воздуха. При достижении температуры заторможенного потока воздуха, поступающего в машину, величины 110–120 °С подача его практически прекращается и автоматически включается подача охлаждающей жидкости. Отвод тепла от поверхностей частей генератора осуществляется за счет испарения охлаждающей жидкости. Охлаждающая жидкость вводится в генератор через пустотелый вал ротора, а затем через радиальные отверстия вала поступает к нагретым частям машины.

При различных условиях полета воздушного судна и величины электрической нагрузки генератора переход с одной системы охлаждения на другую обеспечивает наибольшую эффективность использования генератора.

2.5. Система охлаждения авиационного двигателя.

Дополнительно, в качестве примера привожу пример охлаждения авиационного двигателя.

Система охлаждения двигателя предназначена для обеспечения оптимального теплового состояния его деталей во всем диапазоне рабочих режимов и заданных климатических условий. Это состояние обеспечивается за счет отвода тепла. Система охлаждения также обеспечивает работоспособность масла, оптимальные условия для испарения топлива и т.д.

Система охлаждения авиационного двигателя является весьма ответственным устройством, правильная работа которого определяет не только надежность работы силовой установки, но и безопасность полета. Эта система при минимальном лобовом сопротивлении должна отвести от двигателя необходимое количество тепла, эквивалентное 30% и более от его мощности.

В настоящее время в зависимости от рабочего тела, используемого для охлаждения ПД, системы охлаждения делят на:

а) системы жидкостного охлаждения (схема жидкостного охлаждения представлена в приложении 3, рис. 1) – циркулирующая в системе охлаждения жидкость отводит тепло в окружающую среду через элементы двигателя и радиатор.

Жидкостные системы охлаждения подразделяются на открытые, закрытые и проточные. Открытые сообщаются с атмосферой, но их нельзя использовать на высотных самолётах, потому что при снижении атмосферного давления температура кипения охлаждающей жидкости падает. Закрытые или замкнутые системы изолированы от окружающей среды с помощью паровоздушного клапана в пробке радиатора. В них выше давление и допустимая температура жидкости – 100–105 °С против 90–95 °С в открытых. Это улучшает теплоотдачу, позволяет уменьшить размеры радиатора и снизить затраты мощности на привод насоса. Проточные системы применяют в судовых и стационарных двигателях: нагретая жидкость выбрасывается наружу, а в двигатель подаётся новая.

По способу циркуляции жидкости различают принудительные системы с насосами, термосифонные, где циркуляция происходит за счёт разницы плотности нагретой и холодной жидкости, и комбинированные: в них наиболее нагретые детали охлаждаются принудительно, а остальные – по термосифонному принципу.

Со временем менялись и охлаждающие жидкости. Сначала использовали воду, причём мягкую или кипячёную, чтобы избежать накипи. Потом стали применять этиленгликоль, который позволяет поднять температуру жидкости до 120–130 °С. Для зимней эксплуатации используют антифриз – смесь этиленгликоля с 45% воды. Он замерзает только при –40 °С, что удобно для холодных условий. При этом антифриз имеет температуру кипения около 100 °С и не подходит в качестве высококипящей жидкости. Его можно оставлять в системе после полёта в холодную погоду – это исключает риск замерзания и повреждения трубопроводов и радиаторов.

Ключевой элемент жидкостной системы – радиатор. В авиации отказались от лобовых радиаторов с большим сопротивлением в пользу выдвигаемых и туннельных. Выдвигаемые можно втягивать в фюзеляж на высокой скорости, оставляя в потоке лишь часть для охлаждения. Туннельные радиаторы размещают в специальном туннеле с диффузором и конфузуром. Встречный воздух замедляется в диффузоре, омывает соты радиатора, затем ускоряется в конфузуре и выходит наружу. Количество воздуха регулируют заслонки, а на многих самолётах их положение автоматически корректирует термостат. Этот прибор связан с термометром и поддерживает нужную температуру охлаждающей жидкости: открывает заслонки при её повышении и закрывает при понижении. Такая автоматика особенно важна на военных самолётах, где лётчик не может отвлекаться на контроль системы охлаждения во время воздушного боя.

Жидкостная система охлаждения авиационного ПД обычно включает центробежный насос, распределительные трубы, радиатор и другие элементы. Мотогандолы двигателей с жидкостным охлаждением делают обтекаемыми: они состоят из панелей, крепящихся к лёгкому каркасу.

б) системы воздушного-тепло отводится потоком воздуха, обтекающим нагретые элементы двигателя.

Принцип работы системы воздушного охлаждения основан на прямом воздействии охлаждающего воздуха на нагретые поверхности двигателя. Ключевая особенность – отсутствие жидкости в качестве промежуточного теплоносителя: воздух непосредственно отбирает тепло от цилиндров, головок блоков и других элементов.

Конструкция системы включает несколько основных элементов. Ребра охлаждения на цилиндрах и головках блоков увеличивают площадь поверхности для более эффективного теплообмена. Чем больше площадь рёбер, тем интенсивнее отводится тепло. Воздушные дефлекторы и направляющие каналы распределяют воздушный поток так, чтобы он равномерно обдувал все критически важные зоны двигателя. Вентилятор или нагнетатель в принудительных системах создаёт направленный поток воздуха, особенно важный на малых скоростях полёта или при работе двигателя на земле. Капот двигателя имеет специальные воздухозаборники и выходные щели. Он не просто защищает двигатель, но и формирует аэродинамический канал для оптимального прохождения воздуха через зону охлаждения. Регулируемые жалюзи или заслонки позволяют изменять количество проходящего воздуха в зависимости от температуры двигателя и режима работы.

Работа системы происходит следующим образом. Во время полёта набегающий воздушный поток поступает через воздухозаборники в капоте. Дефлекторы направляют его к наиболее нагретым участкам – головкам цилиндров и верхним частям гильз. Воздух проходит между рёбрами охлаждения, забирая тепло, и выходит через выходные отверстия в задней части капота.

На земле или при малых скоростях полёта, когда набегающего потока недостаточно, задействуется вентилятор. Он принудительно прогоняет воздух через рёбра охлаждения, обеспечивая необходимый теплоотвод. В некоторых системах вентилятор приводится в действие от коленчатого вала двигателя, в других – имеет отдельный привод.

Температура двигателя контролируется с помощью датчиков. Если она повышается сверх нормы, пилот или автоматика может открыть дополнительные жалюзи, увеличивая приток воздуха. При излишне интенсивном охлаждении жалюзи частично закрываются, чтобы сохранить оптимальный тепловой режим.

У системы воздушного охлаждения есть ряд преимуществ. Она отличается простотой конструкции: в ней нет радиаторов, насосов, трубопроводов и охлаждающей жидкости, что снижает вес и повышает надёжность. Система менее уязвима к механическим повреждениям по сравнению с жидкостными системами. Двигатель быстрее прогревается при запуске, особенно в холодную погоду. Обслуживание упрощено, поскольку не требуется контроль уровня и состояния охлаждающей жидкости. Меньший вес конструкции особенно важен для лёгких летательных аппаратов.

Вместе с тем у системы есть и недостатки. Её эффективность ограничена при высоких мощностях двигателя – сложно обеспечить равномерное охлаждение всех деталей. Работа зависит от скорости полёта: на малых

скоростях и при стоянке на земле требуется принудительная вентиляция. Из-за работы вентиляторов и интенсивного воздушного потока уровень шума повышается. Кроме того, сложно организовать охлаждение отдельных узлов, которые трудно обдуть, например нижних частей цилиндров.

Системы воздушного охлаждения чаще всего применяются в ПД небольшой и средней мощности. Они хорошо подходят для учебных самолётов, беспилотников и некоторых вертолётов. Благодаря своей надёжности и простоте такие системы остаются востребованными там, где критически важны малый вес, неприхотливость в эксплуатации и высокая выносливость конструкции.

в) системы жидкостно-воздушного охлаждения являются комбинацией двух указанных выше систем, что позволяет эффективно поддерживать оптимальную температуру деталей во всём диапазоне рабочих режимов и при любых условиях полёта.

Принцип работы такой системы основан на последовательной передаче тепла от самых нагретых частей двигателя к окружающей среде. Сначала охлаждающая жидкость циркулирует по рубашке охлаждения – специальной полости, которая окружает наиболее теплонагруженные элементы двигателя. Жидкость поглощает тепло от цилиндров, головок блоков и других деталей, предотвращая их перегрев.

Затем нагретая жидкость направляется к радиаторам или теплообменникам. Здесь происходит второй этап охлаждения: тепло передаётся от жидкости к воздуху. Для этого через радиаторы пропускается воздушный поток. Он может создаваться двумя способами: за счёт набегающего воздуха во время полёта либо с помощью вентиляторов или специальных дефлекторов, направляющих воздух через соты радиатора.

Циркуляцию охлаждающей жидкости обеспечивает насос (помпа), который прокачивает её по замкнутому контуру. Важную роль играет термостат – он автоматически регулирует путь движения жидкости. При холодном двигателе она циркулирует по малому кругу, не проходя через радиатор, что ускоряет прогрев. Когда температура достигает рабочих значений, термостат открывает путь к радиатору – жидкость начинает проходить большой круг, отдавая тепло в окружающую среду.

Количество воздуха, проходящего через радиатор, также регулируется. Для этого используются заслонки или подвижные дефлекторы. В современных системах их положение может корректироваться автоматически в зависимости от температуры охлаждающей жидкости. Если двигатель нагревается сильнее, заслонки открываются шире, увеличивая поток воздуха и интенсивность охлаждения. При снижении температуры они частично закрываются, сохраняя оптимальный тепловой режим.

В конструкции системы обычно присутствуют разные элементы. Рубашка охлаждения двигателя окружает теплонагруженные части и обеспечивает первичный отбор тепла. Радиаторы или теплообменники служат для передачи тепла от жидкости к воздушному потоку. Насос для циркуляции жидкости поддерживает движение теплоносителя по системе. Термостат регулирует

маршрут движения жидкости в зависимости от её температуры. Трубопроводы для подачи и отвода жидкости соединяют все компоненты в единый контур. Воздушные дефлекторы или каналы направляют поток воздуха к радиаторам. Регулирующие заслонки контролируют объём проходящего воздуха, помогая поддерживать нужный температурный режим.

Преимущества жидкостно-воздушной системы очевидны. Она обеспечивает более равномерное охлаждение по сравнению с чисто воздушными системами, что позволяет повысить мощность двигателя без риска перегрева. Благодаря термостату и регулируемым заслонкам система адаптируется к разным режимам работы – от малого газа до максимальной тяги. Кроме того, сочетание жидкостного и воздушного охлаждения помогает уменьшить габариты радиаторов и снизить затраты мощности на работу системы.

Такая система особенно важна для авиационных двигателей, где требуется высокая надёжность и безопасность. Она применяется как в поршневых, так и в некоторых типах газотурбинных двигателей, в том числе на вертолётах и беспилотных летательных аппаратах. Грамотно спроектированная жидкостно-воздушная система охлаждения позволяет лётчику сосредоточиться на управлении самолётом, не отвлекаясь на контроль температурного режима, а автоматика сама поддерживает оптимальные условия двигателя [6].

Заключение

В рамках индивидуального проекта была рассмотрена тема «Система охлаждения электрических машин в авиации». Актуальность темы обусловлена постоянным ростом мощности электрических машин при одновременном уменьшении их габаритов, а также ужесточением требований к коэффициенту полезного действия и общей надёжности оборудования.

Цель проекта – анализ современных систем охлаждения и поиск новых решений проблемы нагрева электрических машин – достигнута посредством решения поставленных задач.

В ходе теоретической части работы изучены виды тепловых потерь в электрических машинах. Среди них потери в меди, то есть потери на сопротивление обмоток, потери в стали, включающие вихревые токи и гистерезис, механические потери, такие как трение в подшипниках и вентиляционные потери, а также добавочные потери, к которым относятся краевые эффекты, пульсации магнитного поля и тому подобное. Кроме того, проанализирована классификация систем охлаждения, в том числе воздушное, жидкостное, испарительное и комбинированное, рассмотрены принципы их действия. Также проведено сравнение эффективности различных систем с учётом авиационных требований к массе, габаритам, надёжности и энергоэффективности.

Практическая часть включала детальный анализ систем охлаждения на примере авиационного генератора и двигателя. В ходе анализа оценены температурные режимы работы оборудования при различных нагрузках, выявлены ключевые факторы, влияющие на эффективность отвода тепла, такие как скорость воздушного потока, теплопроводность материалов и конструкция

каналов охлаждения. Кроме того, определены сильные и слабые стороны применяемых решений для конкретных типов электрических машин.

Основные выводы, к которым удалось прийти в результате исследования, таковы. Тепловые потери в электрических машинах напрямую влияют на их КПД и ресурс. При уменьшении габаритов машин плотность тепловых потоков возрастает, что требует более эффективных систем охлаждения. Воздушные системы охлаждения отличаются простотой и лёгкостью, но их эффективность ограничена при высоких нагрузках, поэтому они подходят для маломощных и среднечастотных машин. Жидкостные системы обеспечивают интенсивный отвод тепла, однако увеличивают массу и сложность конструкции, из-за чего их целесообразно применять для высокомоментных агрегатов. Комбинированные системы, например жидкостно-воздушные, демонстрируют оптимальный баланс между эффективностью и массой, что делает их перспективными для применения в авиации. Для авиационных генераторов и двигателей критически важны компактность системы охлаждения, устойчивость к вибрациям и перепадам давления, а также минимальное энергопотребление вспомогательных элементов, таких как насосы и вентиляторы. Наконец, современные тенденции развития направлены на использование инновационных материалов, в том числе теплопроводящих полимеров и композитов, а также новых технологий – тепловых труб, микроканальных радиаторов и фазопереходных материалов.

Практическая значимость результатов проекта состоит в том, что полученные данные позволяют обоснованно выбирать тип системы охлаждения для авиационных электрических машин с учётом их мощности и условий эксплуатации. Выявленные недостатки существующих решений могут служить основой для разработки усовершенствованных систем. Кроме того, результаты анализа применимы при проектировании новых авиационных генераторов и электродвигателей, а также при модернизации уже существующих систем.

Таким образом, проведённое исследование подтвердило актуальность поиска новых решений в области охлаждения электрических машин для авиации. Совершенствование этих систем позволит повысить КПД, надёжность и безопасность авиационной техники, что соответствует современным тенденциям развития отрасли.

Список литературы

1. Абрамов М.А., Лавров А.Ю., Паршина А.В., О.В. Теряев. Авиационные электрические машины: учебное пособие. – Самара: Издательство Самарского университета, 2025. – 108 с.

2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. – Санкт-Петербург: Издательство Питер, 2008. – 320 с.

3. Епифанова А.П., Епифанов Г.А. Электрические машины. – Санкт-Петербург: Издательство Лань, 2022. – 300 с.

4. Л.А. Гришина, С.Б. Полудницын. Сравнительный анализ системы кондиционирования воздуха с применением панельного и пассивного теплообмена для пассажирского самолета – М.: «МИФИ». – 2025 / [cyberleninka.ru]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article>

5. М.С. Драгомиров, С.А. Журавлев, А.М. Зайцев. Анализ эффективности систем охлаждения тяговых асинхронных двигателей и мотор генераторов – М.: «МИФИ». – 2016 / [cyberleninka.ru]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article>

6. М.Ю. Орлов, А.А. Горшкалев, С.С. Корнеев, В.В. Урлапкин. Авиационные двигатели внутреннего сгорания. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 236 с.

Приложение 1

Таблица классов изоляции

Класс изоляции	Температура
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	Более 180

Приложение 2

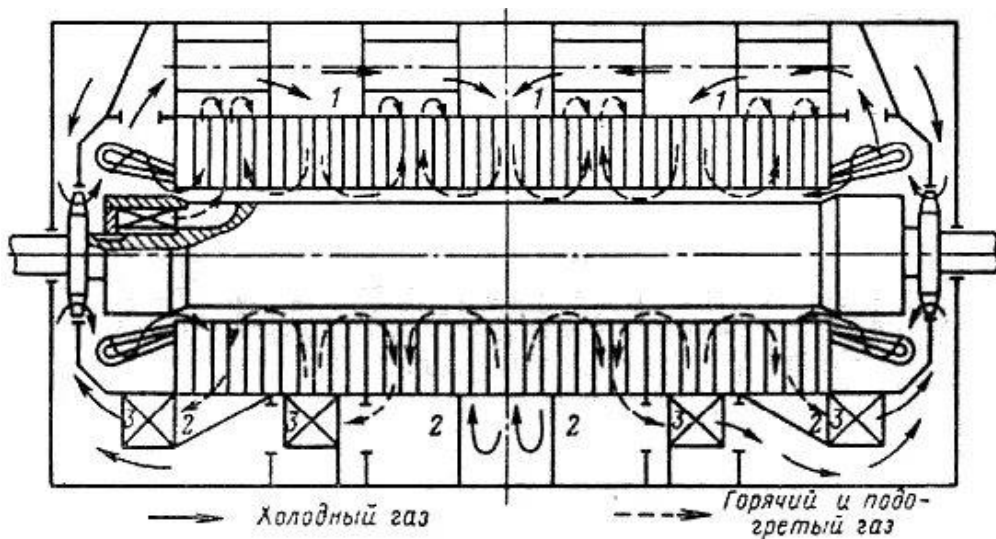


Рис. 1. Схема самовентиляции авиационного генератора

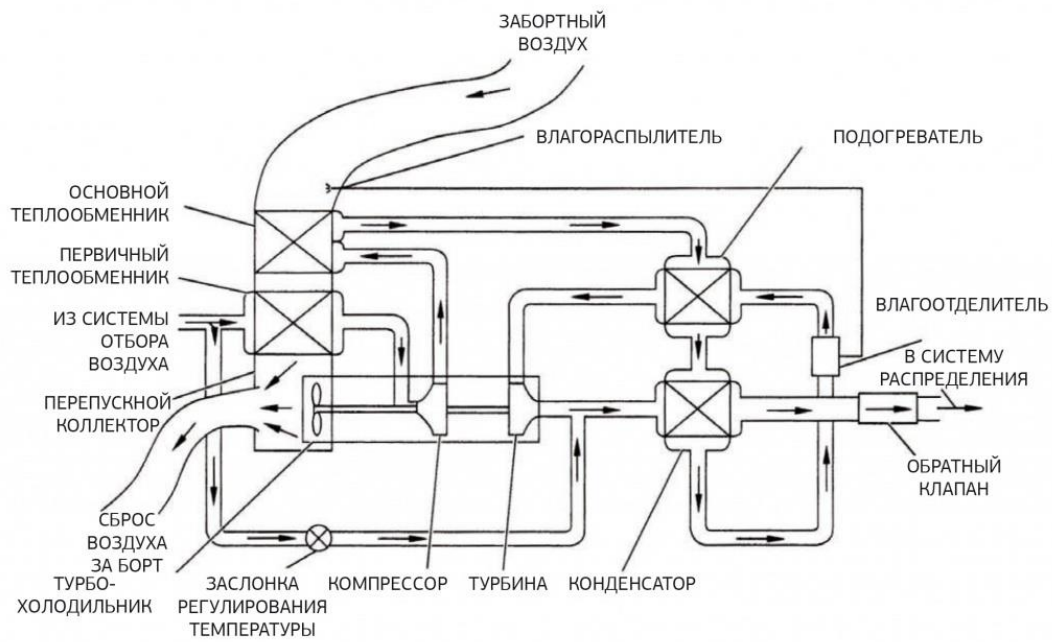


Рис. 2. Схема продува заборного воздуха авиационного генератора

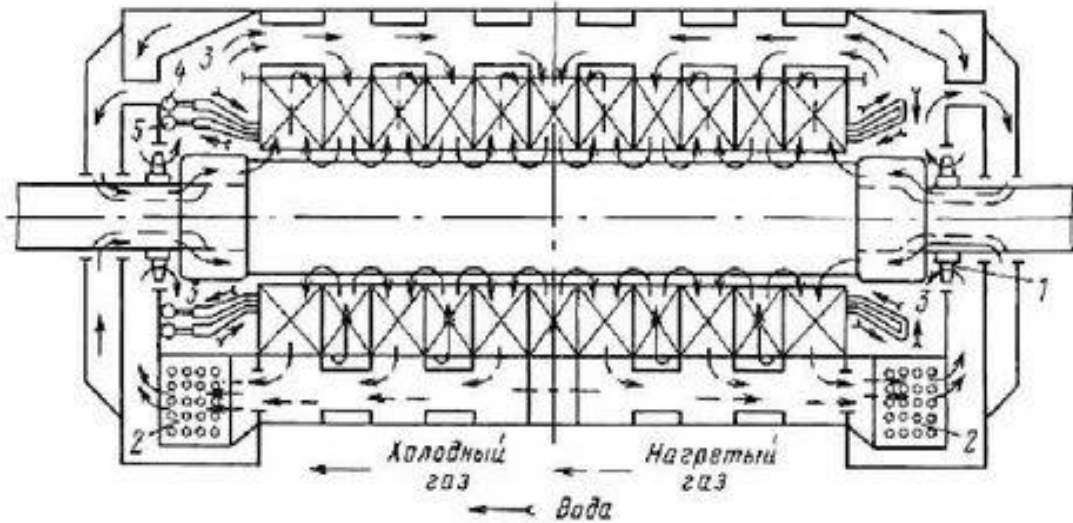


Рис. 3. Схема жидкостного охлаждения авиационного генератора

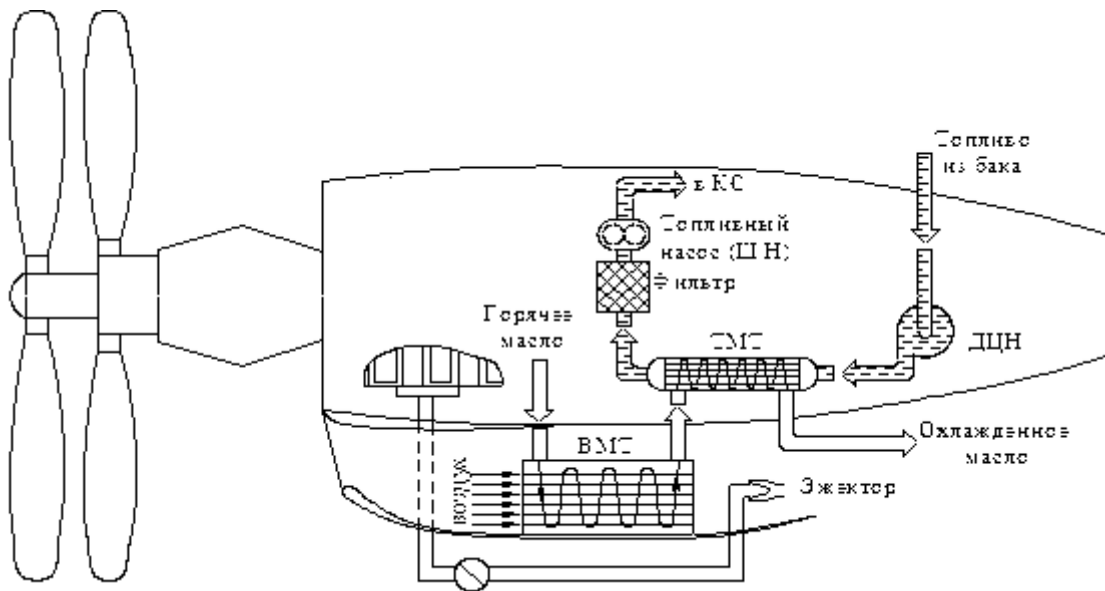


Рис. 4. Схема комбинированного охлаждения авиационного двигателя

Приложение 3

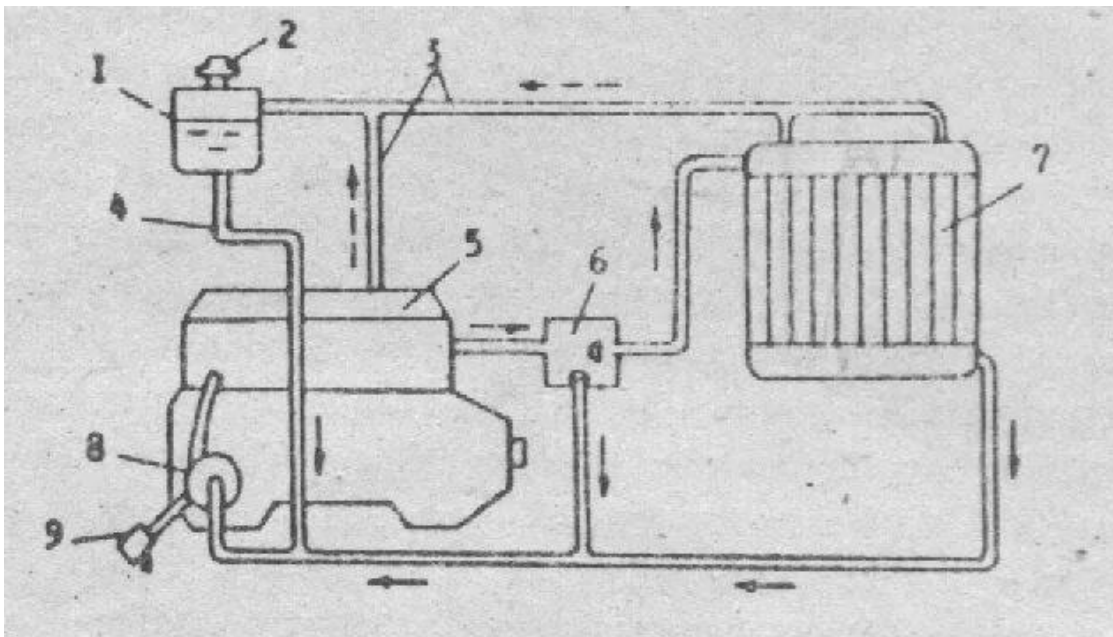


Рис. 1. Схема жидкостного охлаждения авиационного двигателя (1 – рубашка охлаждения двигателя; 2 – жидкостный насос (помпа); 3 – радиатор; 4 – термостат; 5 – расширительный бачок; 6 – подводящие и отводящие трубопроводы и шланги; 7 – датчик температуры).

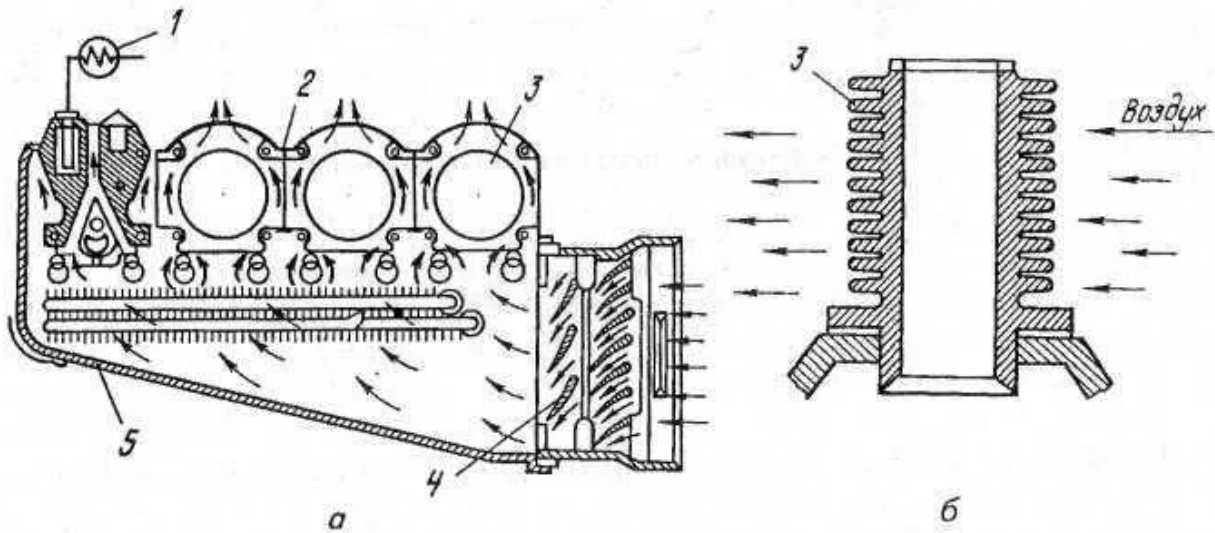


Рис. 2. Схема жидкостного охлаждения авиационного двигателя
(1 – воздухозаборник; 2 – жалюзи; 3 – воздушные дефлекторы; 4 – кожух;
5 – вентилятор)

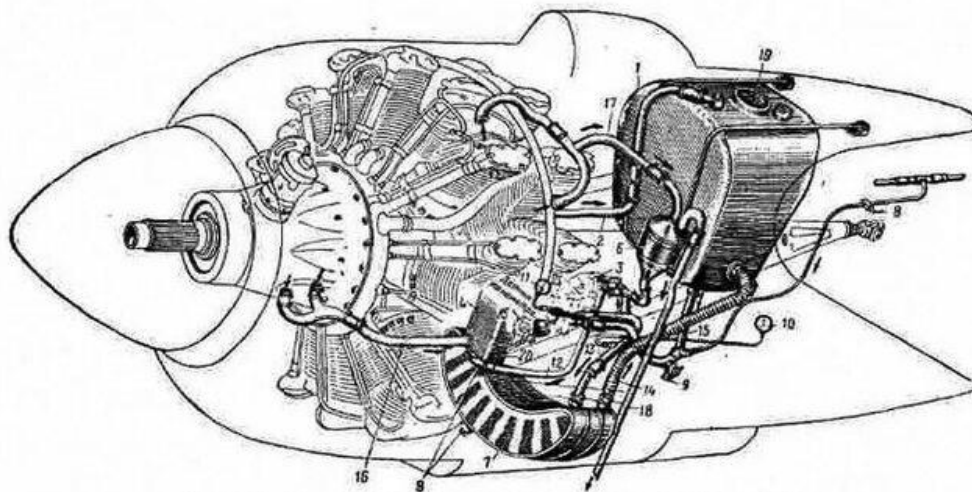


Рис. 91. Схема внешней системы смазки двигателя воздушного охлаждения:
1 – масляный бак; 2 – дренажная трубка; 3 – масляный насос; 4 – маслоборник; 5 – фильтр; 6 – маслоудерживающий бачок; 7 – радиатор; 8 – кран для разжигания масла; 9 – сливные краны; 10 – термометр; 11 – манометр; 12, 13, 14, 15 и 16 – трубопроводы; 17 – дренажная трубка квартера; 18 – дренажная трубка; 19 и 20 – фильтры; 21 – маслоборник

Рис. 3. Схема жидкостно-воздушного охлаждения авиационного двигателя.
(1 – рубашка охлаждения двигателя; 2 – жидкостный насос (помпа); 3 – радиаторы;
4 – термостаты; 5 – расширительный бачок; 6 – подводящие и отводящие
трубопроводы и шланги; 7 – воздухозаборники и дефлекторы; 8 – вентилятор).

Аддитивные технологии в изготовлении элементов электрических машин

Тинеева Е.А.

МАОУ Лицей № 155 им. Героя Советского Союза Н.В. Ковшовой

Введение

Особое место в современном производстве электрических машин занимают аддитивные технологии, которые предлагают принципиально новый подход к созданию изделий путем послойного наращивания материала. Данный метод позволяет получать детали сложной геометрической формы, оптимизировать структуру изделия для снижения веса без потерь прочности, а также сокращать сроки разработки и производства.

Данная технология является актуальной в наше время, так как требования к электрическим машинам растут – нужно повысить эффективность, уменьшить массу и габариты, лучше отводить тепло и быстро адаптировать изделия под заказ. Традиционное производство не всегда позволяет сделать сложные внутренние каналы охлаждения, встроенные датчики или оптимальные конструкции. Аддитивные технологии (АТ) дают такую свободу проектирования и позволяют создавать более компактные и эффективные машины. Однако, несмотря на свой потенциал, полноценное внедрение АТ в серийное производство электрических машин требует глубокого анализа существующих технологий, оценки их применимости и экономической эффективности.

Целью данного проекта является анализ возможностей применения АТ при изготовлении деталей электрических машин.

Для достижения поставленной цели в рамках проекта будут решены следующие задачи:

Изучить существующие виды и методы аддитивных технологий.

Определить возможность применения существующих аддитивных технологий при изготовлении деталей, являющихся составными частями электрических машин.

Проанализировать эффективность применения аддитивных технологий в различных видах производства.

Предмет исследования: возможности, особенности и эффективность применения аддитивных технологий для изготовления компонентов электрических машин, а также перспективы их интеграции в производственные процессы.

Объект исследования: процессы изготовления компонентов электрических машин с использованием различных видов аддитивных технологий.

Методы исследования: в ходе работы будут применены следующие методы:

1. Теоретический анализ: изучение научно-технической литературы в области аддитивных технологий.

2. Систематизация и классификация: упорядочивание информации о видах АТ и их применимости.

3. Сравнительный анализ: сопоставление характеристик и возможностей различных АТ, а также сравнение с традиционными методами производства.

Практическая значимость:

Результаты проекта позволят оценить возможность применения аддитивных технологий при изготовлении деталей электрических машин.

Глава 1. Типы аддитивных технологий.

Аддитивные технологии – это не один способ, а целая группа разных методов 3D-печати. Каждый из них работает по-своему, использует свои материалы и имеет свои плюсы. Официально все эти методы делят на семь основных категорий. Если же говорить о создании деталей для электрических машин, то самым перспективными считаются следующие виды:

1.1. Спекание/плавление в слое порошка

Спекание/плавление в слое порошка (PBF) – это способ, в котором печать происходит посредством термической обработки порошкообразного материала. Под тепловым воздействием порошок слой за слоем затвердевает, спекается, тем самым образуется модель. Главный плюс PBF для электрических машин: можно создавать сердечники статоров и роторов сложной и точной формы, что невозможно сделать классическими методами. Это помогает улучшить их магнитные свойства, уменьшить потери энергии и даже встраивать охлаждающие каналы прямо внутрь детали, делая машину гораздо эффективнее. Но есть и недостатки: оборудование и материалы стоят дорого. Сама печать и дальнейшая обработка требует особых мер безопасности, что усложняет и удорожает весь процесс.

1.2. Экструзия материала

Экструзия материала (или FDM-печать) – моделирование, в котором основной особенностью является наплавка. Сущность метода заключается в наплавлении материала, который при нагреве становится пластичным, на подложку. Материал наносится послойно. Главные плюсы FDM – низкая стоимость оборудования и материалов, простота использования, широкий выбор пластиков и возможность печатать крупные детали. Благодаря этому в электромашиностроении FDM отлично подходит для быстрого и недорогого создания прототипов корпусов, вентиляторов, крышек и других некритичных пластиковых деталей. Однако у FDM есть и минусы: на готовых изделиях заметны слои, поверхность получается не идеально гладкой, а прочность детали может сильно отличаться в разных направлениях. Точность печати не самая высокая, а создание сложных или больших объектов может занять много времени.

1.3. Струйное нанесение материала

Печать в струйном нанесении материала основана на послойном струйном нанесении жидкого фотополимера с последующим отверждением каждого слоя под УФ-излучением. Процесс напоминает работу обычного струйного принтера, но вместо чернил используются фотополимерные материалы, а слои формируются вертикально. Преимуществами являются полноцветная печать (возможность смешивания фотополимеров для получения многоцветных и

полупрозрачных изделий), точность печати (детали получаются очень гладкими, без видимых слоев). Однако такие изделия имеют высокую хрупкость, дороговизна материалов и ограничения по размеру (детали получаются не очень большие). Используется данный метод в промышленном дизайн-прототипировании и медицине (анатомические модели).

1.4. Листовое ламинирование

Листовое ламинирование объединяет технологии, где тонкие листы материала (бумага, пластик, металл) соединяются послойно, а излишки удаляются для формирования объекта. Плюсами данного метода являются: дешевое производство (материалы и оборудование обычно дешевле, чем у порошковых или смоляных систем); можно делать крупные макеты быстрее, чем некоторые другие АТ; простая технология – легко понять и обслуживать, нет сложной работы с металлическим порошком; большие размеры – удобно печатать большие визуальные прототипы и формы; можно получить разноцветные или многослойные структуры. Однако выделяются такие минусы, как: низкая точность и детализация – мелкие элементы и тонкие стенки получаются плохо; шероховатая поверхность – требуется шлифование и доработка, особенно по слоям среза; слабая прочность между слоями – деталь может ломаться по слоям, не подходит для нагруженных узлов; ограничения по материалам – не все технические пластики или металлы можно применять, бумага или недорогие пластики – чаще всего. Также обязательна постобработка – удаление остатков клея, шлифовка, герметизация.

Используется листовое ламинирование для крупных визуальных прототипов, макетов, архитектурных моделей, форм или, когда важна низкая цена и большая длина/ширина.

1.5. Струйное связывание

Струйное связывание – процесс аддитивного производства, при котором жидкое связующее избирательно наносится на слой порошкового материала (металлы, керамика, песок), формируя объект слой за слоем. После печати изделие проходит постобработку, такую как спекание или инфильтрация, для достижения прочности. Плюсы струйного связующего – это высокая скорость печати, возможность работы с большими объемами построения, относительно низкая стоимость порошков и отсутствие структур поддержки. Технология позволяет работать с металлическими, керамическими порошками и песком. Это перспективно для изготовления сердечников из магнитно-мягких материалов со сложной топологией, а также для быстрого производства литейных форм и стержней из песка для традиционного литья крупногабаритных корпусов, сокращая время подготовки к производству. Минусы струйного нанесения включают в себя обязательную и интенсивную постобработку (спекание приводит к усадке и требует точного контроля), более низкую плотность и прочность конечных металлических деталей по сравнению с PBF, а также шероховатую поверхность.

1.6. Прямой подвод энергии и материала (Directed Energy Deposition, DED)

Прямой подвод энергии и материала (Directed Energy Deposition, DED) – технология аддитивного производства, при которой материал (обычно в виде порошка или проволоки) плавится с помощью направленного источника энергии, такого как лазер, электронный луч или плазменная дуга, и осаждается слой за слоем для создания или ремонта объектов. Плюсы DED – это уникальная возможность ремонта и восстановления дорогостоящих металлических компонентов электрических машин (валов, корпусов), высокая скорость наплавления и возможность создания крупногабаритных деталей. Минусы DED – низкая точность и шероховатая поверхность, требующая значительной механической постобработки, а также высокая стоимость и сложность оборудования, сильные термические напряжения в деталях.

1.7. Фотополимеризация

Фотополимеризация – процесс аддитивного производства, в котором жидкий фотополимер выборочно отверждается (полимеризуется) в ванне световым излучением. Её главные преимущества – исключительная точность, высокая детализация и очень гладкая поверхность изделий, а также возможность создавать тонкие стенки. Однако у этой технологии есть и недостатки: многие стандартные смолы получаются хрупкими, требуется обязательная постобработка деталей, размер печатаемой области ограничен, сами смолы довольно дороги, и при печати часто необходимы поддерживающие структуры, которые потом приходится удалять. Используется для создания высокоточных деталей в машиностроении, медицине, дизайне и прототипировании.

1.8. Итог

Обзор методов аддитивного производства подтверждает их способность создавать детали практически любой сложности из самых разных материалов. Эти технологии предоставляют инженерам беспрецедентную свободу в проектировании и оптимизации конструкций, которую невозможно достичь традиционными методами. Данный фундамент позволяет перейти к изучению конкретных областей применения аддитивных решений. В следующей главе мы рассмотрим, как эти методы трансформируют производство электрических машин, открывая новые возможности для улучшения их характеристик.

Глава 2.

Аддитивные технологии в производстве электрических машин

С ростом энергоёмкости электрических машин традиционные производственные процессы сталкиваются со значительными ограничениями, что приводит к ограниченному выбору технических решений при проектировании и изготовлении. Решением этих проблем могут стать аддитивные технологии, во многом превосходящие традиционные методы.

Проблемы, возникающие при использовании традиционных методов производства

В данной области уже проделана значительная работа с использованием традиционных методов проектирования и производства, но эти подходы уже

исчерпали свои возможности из-за связанных с ними технических ограничений. Поскольку эти машины состоят из отдельных частей, разные детали производятся разными компаниями и затем собираются в единое целое в другом месте. В связи с этим возникают следующие проблемы:

Невозможность изготовления сложных несимметричных машин.

Создание прототипов требует много времени.

Взаимозависимость поставщиков и производственных цепочек.

Высокие логистические задержки.

В процессе проектирования и производства на различных этапах включаются предприятия и организации.

Затратность разработки специализированного оборудования.

Все эти технические проблемы можно решить при помощи аддитивных технологий, однако уровень технического прогресса в настоящее время не позволяет применять аддитивные технологии полной мере.

2.1. Решение технических проблем с помощью аддитивного производства

При аддитивном производстве электрических машин традиционные проблемы, связанные с разработкой, больше не являются препятствием. Поскольку все детали можно изготавливать одновременно, весь процесс становится экономически целесообразным, быстрым и надежным. Доступность различных материалов в виде порошка дает возможность оптимизировать конструкцию, а также печатать и тестировать ее в сжатые сроки. Поскольку зависимость от различных компаний минимальна, снижение затрат на логистику значительно уменьшает общую стоимость производства.

Область применения аддитивных технологий в электрических машинах

Аддитивные технологии находят широкое применение в производстве электрических машин, позволяя решать ряд технологических и конструктивных задач, которые сложно реализовать традиционными методами. Основные области применения включают изготовление корпусных элементов, роторов, статоров, обмоток, магнитопроводов, постоянных магнитов и систем терморегулирования.

Корпусные элементы:

3D-печать позволяет создавать корпуса сложной геометрии с интегрированными каналами охлаждения, что улучшает теплоотвод и повышает эффективность двигателя. Исследования показывают, что оптимизированные с помощью топологической оптимизации и изготовленные методом 3D-печати корпуса обеспечивают снижение температуры обмоток на 15–20% по сравнению с традиционными конструкциями.

Катушки/обмотки:

Аддитивные технологии открывают новые возможности для создания обмоточных узлов электрических машин. Например, можно печатать обмотки со встроенной керамической изоляцией или каналами для охлаждения, что исключает дополнительную обработку. Такая изоляция очень надежна и выдерживает высокие температуры. По сравнению с традиционными смолами,

она лучше отводит тепло, позволяя увеличить плотность тока в катушках. В целом, АТ дают возможность создавать уникальные конструкции обмоток, улучшая технологичность и эффективность производства.

Системы охлаждения:

АТ предоставляют возможность создание внутренних каналов охлаждения любой формы для эффективного отвода тепла, что позволяет увеличить мощность машины или продлить срок ее службы. Также можно печатать теплообменники с высокой площадью поверхности и оптимальной топологией для максимальной эффективности теплопередачи.

Магнитные сердечники:

Новые технологии позволяют создавать сердечники сложной формы с внутренними каналами для охлаждения, что повышает эффективность и мощность машины. Возможность точного контроля состава материала и структуры позволяет создавать сердечники с высокой магнитной проницаемостью и низкими потерями на гистерезис. Также использование топологической оптимизации и решетчатых структур позволяет значительно уменьшить массу сердечника, что критически важно для авиации, электромобилей и портативных устройств.

2.2. Итог

Таким образом, аддитивные технологии (АТ) открывают беспрецедентные возможности для производства электрических машин, позволяя создавать компоненты с уникальной геометрией, оптимизированными характеристиками и сниженным весом. Мы увидели, как АТ помогают преодолевать ограничения традиционных методов, предлагая решения для эффективного охлаждения, улучшения магнитных свойств и т. д. Это ведет к созданию более компактных, мощных и надежных электрических машин, способных работать в самых требовательных условиях.

Ценность аддитивных технологий выходит за рамки заводского производства. Способность быстро создавать детали по цифровым моделям делает их незаменимыми там, где традиционная логистика неэффективна. В следующей главе мы рассмотрим, как АТ применяются для оперативного ремонта и восстановления техники в полевых условиях, предлагая эффективные решения в самых критических ситуациях.

2.3. Аддитивные технологии в полевом ремонте и восстановлении деталей.

Аддитивные технологии особенно ценны там, где нужно быстро изготовить или отремонтировать деталь в единичном экземпляре или очень малой партией. Это делает их незаменимыми для применения в полевых условиях, где традиционные методы починки зачастую невозможны из-за отсутствия доступа к оборудованию, ограниченности времени и ресурсов. Именно в таких ситуациях 3D-печать открывает революционные возможности для ремонта и восстановления деталей.

Почему аддитивные технологии идеальны для полевых условий:

Быстрое изготовление: в отличие от долгих процессов заказа и доставки новых деталей, 3D-печать позволяет создавать или восстанавливать компоненты

за часы, а не дни или недели. Это критически важно для минимизации простоя техники и оборудования.

Мобильность и компактность: Портативные 3D-принтеры могут быть относительно легкими и компактными, что позволяет транспортировать их в труднодоступные места (военные базы, удаленные строительные площадки, исследовательские станции).

Восстановление по требованию: Вместо хранения большого склада запасных частей (что сложно и дорого в полевых условиях) можно печатать нужную деталь "по запросу", используя цифровые модели.

Уникальные возможности для ремонта:

- **Восстановление изношенных поверхностей:** Технологии, такие как порошковая наплавка (LMD - Лазерная наплавка металлом), позволяют наносить новый слой металла на поврежденную деталь, восстанавливая её геометрию и функциональность. Это особенно актуально для валов, шестерен, корпусов.

- **Изготовление ремонтных вставок и заплаток:** 3D-печать из прочных полимеров или металлов позволяет создавать точно подогнанные ремонтные элементы, которые затем интегрируются в поврежденную конструкцию.

- **Ремонт сложных геометрических форм:** Аддитивные технологии могут восстанавливать детали с внутренней структурой или сложными контурами, которые было бы трудно или невозможно отремонтировать другими способами.

Использование переработанных материалов: в некоторых случаях возможно использование переработанного металла или пластика, что сокращает затраты и экологический след, особенно в условиях ограниченных ресурсов.

Примеры применения:

- **Военная техника:** Ремонт поврежденных в бою или во время учений компонентов бронетехники, самолетов, кораблей.

- **Строительная и добывающая техника:** Восстановление изношенных частей экскаваторов, буровых установок, работающих в удаленных регионах.

- **Энергетика:** Срочный ремонт деталей турбин или генераторов на отдаленных электростанциях.

- **Медицина:** Изготовление индивидуальных имплантатов или медицинского оборудования в экстренных ситуациях.

В настоящее время в зоне специальной военной операции специалисты ремонтно-восстановительных подразделений группировки войск «Восток» уже приступили к пробе и установлению качества экспериментального мобильного аддитивного комплекса. Он будет использоваться для изготовления нужных деталей, находящихся в высоком дефиците и необходимых для ремонта поврежденной техники. На комплексе, который оборудован специальными принтерами, работники изготавливают необходимые детали и комплектующие из резины для поврежденной во время боев оборудования. Инновация позволяет создавать недостающие запчасти и проводить ремонт техники практически в любых условиях. Логистика больше не является проблемой – любую нужную деталь выпускают в полном соответствии со всеми характеристиками. «Это комплекс полного цикла, позволяющий выпускать свыше 10 деталей в день в

условиях работы одной смены, которая может быть увеличена при постановке задач до трехсменного режима круглосуточного выпуска изделий», – рассказал начальник мобильного аддитивного комплекса группировки войск «Восток» Игорь. Он также добавил, что новые детали могут быть выпущены менее чем за сутки с момента их поступления в работу.

Несмотря на значительные преимущества, использование 3D-печати в зоне боевых действий и в удаленных регионах сталкивается с серьезными препятствиями.

Вот основные минусы и вызовы применения аддитивных технологий (АТ) в полевых условиях:

1. Чувствительность к окружающей среде. Промышленные и строительные 3D-принтеры – это сложное высокоточное оборудование, которое плохо переносит экстремальные условия:

Пыль и грязь: засорение печатающих головок, направляющих и датчиков приводит к сбоям и поломкам.

Температурные колебания: для застывания строительных смесей или пластиков нужен определенный температурный режим. На сильном морозе или жаре материал может трескаться, не схватываться или деформироваться.

Влажность: многие материалы (особенно порошки для металла и строительные смеси) гигроскопичны – они впитывают влагу из воздуха, что портит их свойства.

2. Требования к энергоснабжению, крупногабаритные 3D-принтеры потребляют большое количество электроэнергии. В полевых условиях это требует наличия мощных и надежных генераторов, а также постоянного подвоза топлива для них, что создает дополнительную нагрузку на логистику и демаскирует позицию шумом.

3. Tактическая уязвимость

- Стационарность и габариты: строительный принтер – это крупный объект, который долго монтируется на одном месте. В условиях современной войны (особенно при активном использовании БПЛА-разведки) такая «недвижимая цель» становится легкой мишенью для артиллерии или дронов-камикадзе.

- Длительность процесса: хотя 3D-печать быстрее традиционной стройки, она всё равно занимает часы и дни. Всё это время оборудование и персонал находятся в уязвимом положении.

- Шум и тепловой след: работающее оборудование легко обнаружить

4. Необходимость квалифицированного персонала

Для обслуживания 3D-принтеров нужны не просто строители или солдаты-инженеры, а высококвалифицированные операторы и ИТ-специалисты, способные работать с цифровыми моделями и устранять программные сбои. В полевых условиях дефицит таких кадров ощущается особенно остро.

5. Время «созревания» конструкций

При печати бетоном объект готов геометрически, но ему требуется время на набор прочности (гидратацию). В отличие от готовых железобетонных

блоков, которые можно использовать сразу, напечатанный бункер нельзя сразу подвергать обстрелу – нужно ждать несколько дней до его полного затвердевания.

6. Сложность обслуживания и ремонта

Если в принтере выйдет из строя специфическая деталь (электроника, высокоточный мотор или сопло), починить её «подручными средствами» в лесу или окопе невозможно. Это делает систему зависимой от поставок высокотехнологичных комплектующих.

7. Ограничение по материалам

Портативные полевые принтеры часто имеют ограниченный выбор материалов. Детали, напечатанные из доступного пластика, могут быть недостаточно прочными для боевых условий, а печать металлом требует ещё более сложного оборудования (вакуумных камер или инертных газов), которое практически невозможно развернуть на передовой.

Таким образом, несмотря на то что у 3D-печати в поле есть свои минусы – сложности с питанием, доставкой материалов и уязвимостью оборудования, её возможности перевешивают. Способность быстро строить и чинить что угодно, адаптироваться к любой ситуации и создавать крепкие, сложные детали делает эту технологию очень перспективной. Чем дальше, тем проще и надёжнее станут такие принтеры, и они точно изменят способы ремонта и строительства в любых, даже самых тяжёлых условиях.

Итог работы и заключение

Аддитивные технологии открывают качественно новые возможности для проектирования, производства и ремонта элементов электрических машин. В ходе работы было подтверждено, что АТ позволяют получать детали сложной топологии (включая внутренние каналы охлаждения и встроенные каналы для датчиков), снижать массу конструкций при сохранении или улучшении прочностных и магнитных характеристик, ускорять цикл прототипирования и обеспечивать оперативный ремонт «по требованию». Эти преимущества делают АТ перспективными как для серийного производства отдельных узлов (магнитопроводы, корпуса, теплообменники), так и для полевых ремонтных комплексов, где важна скорость и мобильность.

Список литературы

1. Кардаш Д.Е. Частная методика оценки эффективности аддитивной технологии строительства объектов военной инфраструктуры // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2023. – № 4(53) – С. 123–129.
2. Морозов Е.А. Аддитивные технологии локального ремонта в машиностроении // Иновации. Наука. Образование. – 2021 – № 30 – С. 888-890.
3. Новичкова А.К., Ланцев В.Ю. Аддитивные технологии в машиностроении – 2023 – № 4.

4. Финогеев Д.Ю., Решетников О.П. – Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения // Вестник Саратовского государственного технического университета – 2020 – № 3 – С. 63–71.

**Список участников, представивших материалы без участия
в конкурсном отборе**

1. Ахмеджанова Дарина Рафкатовна
2. Галеева Аделия Руслановна
3. Меркушев Даниил Максимович
4. Мухаматуллина Камилла Ришатовна
5. Нестерова Вера Константиновна
6. Юшкова Злата Андреевна

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Научное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. АВИАЦИЯ И КОСМОС – 2026

Материалы

Региональной научно-практической конференции

«Электротехника. Авиация и космос – 2026»

(г. Уфа, 10 апреля 2026 г.)

Электронное издание сетевого доступа

*За достоверность информации, изложенной в статьях,
ответственность несут авторы.*

Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано к использованию 09.06.2026 г.
Гарнитура «Times New Roman». Объем 3,45 Мб.
Заказ 94.

*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
450008, Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.*

Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: ric-bdu@yandex.ru