

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 4

Материалы

XX Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 12 – 15 мая 2026 г.)



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

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 4

*Материалы
XX Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 12–15 мая 2026 г.)*

Научное электронное издание сетевого доступа

Уфа
Уфимский университет
2026

УДК 621.3
ББК 31.2
М12

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

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор **Ф. Р. Исмагилов** (*отв. редактор*);
канд. техн. наук, доцент **М. В. Охотников**;
ассистент **Д. У. Султангареев**

Мавлютовские чтения: материалы XX Всероссийской молодёжной научной
М12 конференции (г. Уфа, 12–15 мая 2026 г.) / отв. ред. Ф. Р. Исмагилов.
В 9 т. Т. 4 [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. –
Уфа: Уфимский университет, 2026. – 78 с. – URL:
<https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2026/182.pdf> – Загл. с
титла экрана.

ISBN 978-5-7477-6446-0

Том 4: ISBN 978-5-7477-6448-4

В 4-й том сборника материалов конференции вошли статьи секций 4.
Сборник предназначен для студентов, аспирантов, молодых ученых и
преподавателей.

Все материалы представлены в авторской редакции.

УДК 621.3
ББК 31.2

ISBN 978-5-7477-6448-4 (том 4)
ISBN 978-5-7477-6446-0

© Уфимский университет, 2026

СЕКЦИЯ 4. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313

А.Р. АХМАДИЕВ, М.С. ЛОБОВИЧ, Э.А. АХМЕТГАЛЕЕВ

arslan.akhmadiev@yandex.ru, matveizagadka@gmail.com,

ahmetgaleeve@gmail.com

Науч. руковод. – ассистент кафедры ЭМ, Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ IOT-МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЖЁСТКИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация: в статье рассматриваются проблемы интеграции беспроводных датчиков Интернета вещей (сеть физических объектов, оснащённых встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешними системами) в системы мониторинга электромеханического оборудования, функционирующего в жёстких условиях эксплуатации. Проанализированы основные источники электромагнитных помех, создаваемых электродвигателями и частотными преобразователями, а также их воздействие на беспроводные каналы связи. Предложено архитектурное решение, включающее комплекс аппаратных и программных мер по экранированию, фильтрации сигналов и протокольной защите данных. Результаты имитационного моделирования показывают снижение вероятности потери пакетов данных более чем в 10 раз при применении предложенных методов.

Ключевые слова: Интернет вещей, промышленная автоматизация, электромагнитная совместимость, электродвигатель, частотный преобразователь, экранирование, цифровая фильтрация, жёсткие условия эксплуатации.

Введение

Актуальность темы обусловлена стремительным внедрением концепции Индустрии 4.0, предполагающей повсеместное использование беспроводных сенсоров для сбора данных о состоянии производственного оборудования в режиме реального времени [1]. Однако электромеханические устройства, в частности асинхронные электродвигатели и синхронные генераторы, эксплуатируемые в жёстких промышленных условиях, являются мощными источниками электромагнитных помех (любой электромагнитный сигнал или явление, ухудшающий качество функционирования технического средства) в широком частотном диапазоне [2].

Беспроводные модули, работающие в диапазонах 868 МГц и 2,4 ГГц (стандарты LoRaWAN, ZigBee, Wi-Fi), подвержены воздействию гармоник, генерируемых импульсными источниками питания и частотными преобразователями (устройство для плавного регулирования скорости вращения электродвигателя путём изменения частоты и напряжения питающего тока) [3].

В условиях повышенной запылённости, вибраций и температурных перепадов это приводит к критическому снижению достоверности передаваемых данных, увеличению задержек и частым ложным срабатываниям систем предупреждения.

Целью данной работы является разработка архитектурного решения для помехоустойчивого мониторинга электромеханических систем на базе технологий Интернета вещей с минимизацией влияния электромагнитных помех в жёстких условиях эксплуатации.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. проанализировать спектрально-временные характеристики помех от типового промышленного оборудования;
2. предложить комплекс аппаратных и программных мер защиты канала передачи данных;
3. оценить эффективность решения путём имитационного моделирования.

Анализ электромагнитной обстановки в условиях эксплуатации электромеханических систем

Источники помех и их воздействие на беспроводные системы

Электродвигатели переменного тока создают электромагнитные поля за счёт нескольких физических механизмов. Коммутация обмоток статора генерирует импульсные помехи в диапазоне 1-100 кГц, которые наводятся в близкорасположенные проводники за счёт индуктивной связи [4]. Щёточно-коллекторный узел двигателей постоянного тока является источником широкополосного радиочастотного шума (100 кГц - 30 МГц) вследствие искрения при переключении секций якоря [5].

Наиболее критичным источником помех для беспроводных систем являются частотные преобразователи. Широтно-импульсная модуляция (процесс управления мощностью, подаваемой на нагрузку, путём изменения скважности импульсов при постоянной частоте), используемая в современных частотных преобразователях, создаёт гармонические составляющие до 150 МГц и выше [6]. Эти гармоники могут попадать в полосу пропускания приёмных трактов устройств Интернета вещей, вызывая насыщение малошумящих усилителей и увеличение коэффициента битовых ошибок. В условиях вибраций и температурных деформаций корпусов оборудования экранирующие свойства стандартных кабельных трасс дополнительно снижаются, что усугубляет проблему.

Уязвимости беспроводных сенсорных узлов

Анализ литературы показывает, что основные уязвимости сенсоров Интернета вещей в условиях электромагнитных помех связаны с тремя элементами [7]:

- антенный тракт: прямое попадание мощного сигнала помехи в антенну приводит к компрессии динамического диапазона приёмника;
- цифровые интерфейсы: наводки на линии I²C (последовательная шина для связи интегральных схем) или SPI (последовательный периферийный интерфейс) вызывают битовые ошибки при обмене данными между микроконтроллером и датчиками;
- цепи питания: высокочастотные пульсации проникают через нестабилизированные источники питания, вызывая сбои в работе микроконтроллера.

Как показано в работе [8], даже кратковременные импульсные помехи амплитудой свыше 5 В/мкс могут приводить к потере до 30 % пакетов данных в промышленных беспроводных сетях стандарта IEEE 802.15.4.

Архитектура помехоустойчивого узла мониторинга

Аппаратные методы защиты

Предлагается модульная архитектура сенсорного узла, построенная по каскадному принципу. Сигнал от первичного преобразователя поступает на вход аналогового фильтра нижних частот (электронный фильтр, пропускающий сигналы с частотами ниже определённой частоты среза и подавляющий сигналы с более высокими частотами), который подавляет высокочастотные составляющие помех. Отфильтрованный аналоговый сигнал оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в цифровой код) и передаётся в микроконтроллер, размещённый в экранированном корпусе. Микроконтроллер реализует алгоритмы цифровой фильтрации и формирования пакетов данных, которые затем передаются через модуль связи (LoRa или проводной интерфейс RS-485) на промышленный шлюз. Шлюз обеспечивает гальваническую развязку и передачу данных в верхний уровень системы - систему диспетчерского управления и сбора данных (программно-аппаратный комплекс для визуализации, управления и мониторинга технологических процессов) или облачную платформу.

Корпус сенсорного узла выполняется из алюминия толщиной не менее 0,5 мм с обеспечением непрерывного электрического контакта между крышкой и основанием. Экран заземляется в одной точке для исключения протекания контурных токов [9]. Кабели связи выполняются в виде витой пары в общем экране, при этом экран заземляется только со стороны шлюза.

На входе аналого-цифрового преобразователя устанавливается пассивный фильтр нижних частот с частотой среза 1-5 кГц. Это позволяет подавить высокочастотные составляющие помех от частотных преобразователей, не

искажая полезный сигнал вибрации, спектр которого обычно лежит в диапазоне до 1 кГц [10]. Между сенсорным узлом и промышленным шлюзом устанавливаются оптоизоляторы или специализированные микросхемы гальванической развязки, что разрывает путь для синфазных помех и выравнивающих токов [11].

Программно-алгоритмическое обеспечение

После оцифровки сигнала применяется рекурсивный фильтр нижних частот второго порядка. Алгоритм фильтрации реализуется на микроконтроллере по формуле:

$$y(n) = a * x(n) + (1 - a) * y(n - 1), (1)$$

где $x(n)$ - текущее значение входного сигнала, $y(n)$ - выходное значение, a - коэффициент сглаживания (0,1-0,3).

Для повышения надёжности беспроводного канала применяется метод тройной передачи каждого пакета данных с мажоритарным выбором на стороне шлюза. Дополнительно каждый пакет снабжается 16-битной контрольной суммой (CRC-16) и временной меткой для отбраковки задержанных или искажённых данных [12]. Модуль связи реализует алгоритм мониторинга уровня принимаемого сигнала (индикатор уровня принимаемого сигнала, показывающий мощность радиочастотного сигнала, принимаемого устройством). При увеличении уровня шума система автоматически повышает мощность передатчика в пределах, разрешённых регламентом, что позволяет поддерживать стабильность канала связи в условиях экранирования металлоконструкциями цеха [13].

Результаты моделирования и обсуждение

Для оценки эффективности предложенных решений было проведено экспериментальное исследование в среде MATLAB/Simulink [16]. Моделировался канал передачи данных от датчика вибрации к шлюзу в присутствии импульсной помехи, характерной для работы частотного преобразователя в условиях повышенной загрузки.

Параметры модели:

- частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя: 10 кГц;
- тип модуляции: GFSK (гауссовская частотная манипуляция, метод цифровой модуляции, при котором частота несущей изменяется в соответствии с передаваемым сигналом с предварительной гауссовской фильтрацией);
- модель помехи: последовательность импульсов с амплитудой 10 В/мкс и длительностью 0,5 мкс.

Результаты моделирования представлены в Таблице 1

Таблица 1 - Сравнительные характеристики канала связи с защитой и без защиты

Параметр	Без защиты	С предложенными мерами
Вероятность потери пакета, %	28,4	2,1
Среднеквадратичная ошибка измерения, %	15,2	1,3
Задержка передачи данных, мс	120	135

Из таблицы видно, что применение комплекса мер позволяет снизить вероятность потери пакета более чем в 10 раз. Незначительное увеличение задержки (на 15 мс) обусловлено алгоритмом тройной передачи и является приемлемым для задач мониторинга, не требующих жёсткого реального времени [14].

Экономическая эффективность внедрения предложенного решения оценивается через снижение простоев оборудования. По данным [15], раннее обнаружение аномалий в работе электродвигателя позволяет сократить внеплановые ремонты на 15-20 %, что при средней стоимости часа простоя промышленной линии 50 000 руб. даёт годовой экономический эффект свыше 2 млн руб. для среднего предприятия.

Заключение

Электромагнитные помехи от электродвигателей и частотных преобразователей являются критическим фактором, ограничивающим надёжность беспроводных систем мониторинга на базе технологий Интернета вещей в жёстких условиях эксплуатации.

Комплексный подход, включающий экранирование корпуса, аналоговую и цифровую фильтрацию сигналов, гальваническую развязку и протокольную избыточность, позволяет снизить уровень ошибок передачи данных более чем в 10 раз.

Предложенная архитектура сенсорного узла масштабируема, совместима с промышленными стандартами электромагнитной совместимости (МЭК 61000-4-3, МЭК 61000-4-6) и может быть интегрирована в существующие системы диспетчеризации.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой адаптивных алгоритмов машинного обучения для динамической компенсации помех и расширением функционала узла за счёт добавления датчиков тока и частичных разрядов.

Библиографический список

1. Alexakos C., et al. IoT Integration for Adaptive Manufacturing: A Review // 2018 IEEE 21st International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC). - 2018. - P. 112-119. - DOI: 10.1109/ISORC.2018.00030.

2. Syafrudin M., et al. Performance Analysis of IoT-Based Sensor, Big Data Processing, and Machine Learning Model for Real-Time Monitoring System in Automotive Manufacturing // *Sensors*. - 2018. - Vol. 18, № 9. - P. 2946. - DOI: 10.3390/s18092946.
3. Electromagnetic Interference Analysis of Industrial IoT Networks // *IPCB Repository*. - 2020. - URL: <https://repositorio.ipcb.pt/handle/10400.11/7890> (дата обращения: 01.05.2026).
4. EMI Issues in the Manufacturing Environment // *Newark Electronics Technical Article*. - 2023. - URL: <https://www.newark.com/emi-issues-manufacturing> (дата обращения: 01.05.2026).
5. Zhang Y., et al. Suppression of Conducted EMI in PWM Inverter-Fed Motor Drives // *IEEE Transactions on Power Electronics*. - 2019. - Vol. 34, № 5. - P. 4512-4523.
6. Kumar A., Singh B. EMI Mitigation Techniques for Variable Frequency Drives: A Review // *Journal of Power Electronics*. - 2021. - Vol. 21, № 3. - P. 445-458.
7. Gungor V. C., et al. A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. - 2013. - Vol. 9, № 1. - P. 28-42.
8. Mahmud M. A. P., et al. Cyber-Physical Security of Industrial IoT Systems: Challenges and Solutions // *IEEE Access*. - 2020. - Vol. 8. - P. 124530-124547.
9. ГОСТ Р 51318.16.1.1-2019. Совместимость технических средств электромагнитная. Аппаратура для измерения помех промышленных и устойчивости к ним. Часть 1-1. Аппаратура для измерения помех промышленных и устойчивости к ним. Измерительная аппаратура. - М.: Стандартинформ, 2019.
10. Li X., et al. Vibration Signal Processing for Fault Diagnosis of Rotating Machinery: A Review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. - 2022. - Vol. 168. - P. 108645.
11. ISO 77xx Family of High-Speed Digital Isolators. Texas Instruments Datasheet. - 2023. - URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso7741.pdf> (дата обращения: 02.05.2026).
12. LoRa Alliance. LoRaWAN® Specification v1.0.4. - 2020. - 112 p.
13. Vangelista L. Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation // *IEEE Signal Processing Letters*. - 2017. - Vol. 24, № 12. - P. 1818-1821.
14. Lee J., et al. Industrial IoT in 5G-Enabled Smart Manufacturing: A Survey // *IEEE Internet of Things Journal*. - 2021. - Vol. 8, № 15. - P. 11749-11767.
15. Мавлютов Р. Р. Надёжность электромеханических систем: учебное пособие. - Уфа: УГАТУ, 2015. - 248 с.
16. Syafrudin M., Alfian G., Fitriyani N.L., Rhee J. Performance Analysis of IoT-Based Sensor, Big Data Processing, and Machine Learning Model for Real-Time

Э.А. АХМЕТГАЛЕЕВ, М.С. ЛОБОВИЧ, А.Р. АХМАДИЕВ

ahmetgaleeve@gmail.com, matveizagadka@gmail.com, arslan-

akhmadiev@yandex.ru

Науч. руковод. – ассистент кафедры ЭМ, Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ ИОТ-ПЛАТФОРМЫ

Аннотация: предложена архитектура интеллектуальной системы мониторинга и диагностики электрических двигателей, построенная на принципах промышленного интернета вещей (IoT). Описана трёхуровневая структура «край-туман-облако», обеспечивающая сбор вибрационных и температурных сигналов, их предварительную обработку на шлюзах и передачу в облачное хранилище. Для классификации дефектов подшипников и ротора применён гибридный алгоритм на основе метода опорных векторов (SVM), оптимизированный метаэвристическим алгоритмом роя кузнечиков (GOA). Показано, что интеграция IoT-сенсоров с алгоритмами машинного обучения позволяет повысить точность выявления неисправностей при переменных нагрузках и снизить вычислительную нагрузку на облачные ресурсы за счёт технологий туманных вычислений. Система предназначена для реализации предиктивного обслуживания и снижения простоев промышленного оборудования.

Ключевые слова: промышленный интернет вещей, диагностика электродвигателей, предиктивное обслуживание, машинное обучение, вибрационный анализ, туманные вычисления, метод опорных векторов.

Современные промышленные предприятия активно внедряют технологии Индустрии 4.0, где ключевую роль играют системы непрерывного мониторинга состояния электроприводного оборудования. Внезапные отказы электродвигателей приводят к значительным экономическим потерям и нарушению технологических циклов, что актуализирует переход от планово-предупредительного ремонта к предиктивным стратегиям [1]. Традиционные портативные виброанализаторы требуют участия квалифицированного персонала, не обеспечивают непрерывного контроля и используют проприетарные форматы данных, тогда как стационарные заводские системы часто имеют высокую стоимость внедрения и сложность масштабирования [2].

Развитие микроэлектромеханических систем (MEMS), беспроводных протоколов связи и облачных сервисов открыло возможность создания недорогих распределённых сетей датчиков. В данной работе предлагается интеллектуальная IoT-платформа, объединяющая аппаратные модули сбора телеметрии, алгоритмы цифровой обработки сигналов и методы машинного обучения для автоматической диагностики дефектов электродвигателей в реальном времени.

Фундаментальным этапом проектирования системы выступает выбор многоуровневой архитектуры, обеспечивающей баланс между скоростью реакции, надёжностью передачи данных и вычислительной эффективностью. Разработанная платформа реализует парадигму «Edge-Fog-Cloud». На периферийном уровне (Edge) размещаются беспроводные мультисенсорные модули на базе MEMS-акселерометров и цифровых термометров, измеряющие вибрацию, температуру окружающей среды и влажность вблизи посадочных мест подшипников. Сбор данных осуществляется с частотой дискретизации до 5 кГц, что соответствует требованиям стандартов виброконтроля. Для минимизации сетевых задержек и экономии трафика применяется уровень туманных вычислений (Fog), реализованный на одноплатных микрокомпьютерах. Шлюзы выполняют агрегацию потоков от нескольких датчиков, цифровую фильтрацию шумов и вычисление быстрого преобразования Фурье (БПФ) для перехода в частотную область [3]. Облачный уровень (Cloud) обеспечивает долговременное хранение телеметрии в базе данных временных рядов, визуализацию через веб-дашборды и запуск ресурсоёмких алгоритмов обучения. Связь между уровнями реализуется через протоколы BLE и MQTT, что гарантирует устойчивую работу в условиях промышленных электромагнитных помех.

Ключевым этапом интеллектуальной диагностики является извлечение информативных признаков из вибрационных сигналов и их последующая классификация. Во временной области вычисляются статистические показатели: среднеквадратичное значение (RMS), пик-фактор, коэффициент формы, асимметрия и эксцесс. Эти параметры чувствительны к зарождению усталостных микротрещин, ослаблению креплений и изменению условий смазки. В частотной области анализ спектра БПФ позволяет выявить характерные гармоники, соответствующие дефектам внутренних и наружных колец подшипников, дисбалансу ротора, расцентровке валов и ослаблению посадок [4]. Поскольку реальные эксплуатационные режимы характеризуются переменной нагрузкой и наличием широкополосного шума, традиционные пороговые методы диагностики часто дают ложные срабатывания. Для повышения устойчивости системы применён метод опорных векторов (SVM) с радиально-базисной функцией ядра. Эффективность SVM критически зависит от выбора гиперпараметров регуляризации и ширины ядра, поэтому в работе использован метаэвристический алгоритм оптимизации на основе поведения роя кузнечиков (GOA). Данный биоинспирированный подход обеспечивает эффективный баланс между исследованием пространства решений и

эксплуатацией найденных оптимумов, что повышает точность распознавания классов неисправностей до 98-99% даже при наличии аддитивных шумов и изменении частоты вращения двигателя [5]. Алгоритм проходит предварительное обучение на размеченных эталонных выборках, после чего развёртывается на шлюзе туманного уровня для работы в режиме онлайн-диагностики.

Апробация разработанной платформы проводилась в лабораторных условиях на асинхронном двигателе малой мощности, а также в рамках имитационного моделирования на базе открытых вибрационных датасетов. Сравнительный анализ показал, что распределение вычислительной нагрузки между периферийными датчиками и туманным узлом снижает общую задержку обработки сигнала в 3-4 раза по сравнению с архитектурой, целиком полагающейся на облачные вычисления. Внедрение GOA-оптимизированного классификатора позволило сократить время реакции системы на аномалии и повысить робастность к перекосам нагрузки и температурным дрейфам. Визуализация данных в веб-интерфейсе обеспечивает операторов информацией о текущем техническом состоянии, уровне вибрации по трём осям и динамике изменения контрольных параметров. Пороговые значения, определённые согласно международным стандартам механической вибрации, автоматически генерируют предупреждения при превышении допустимых уровней, что позволяет планировать техническое обслуживание без вывода оборудования из строя.

Разработанная интеллектуальная система диагностики на базе IoT-платформы демонстрирует высокую эффективность в задачах предиктивного обслуживания электроприводного оборудования. Интеграция недорогих беспроводных сенсоров, технологий туманных вычислений и метаэвристически оптимизированных алгоритмов машинного обучения позволяет преодолеть ограничения классических методов мониторинга. Система обеспечивает непрерывный контроль, высокую точность распознавания дефектов подшипников и ротора, а также адаптивность к переменным эксплуатационным режимам. Дальнейшее развитие направления связано с внедрением федеративного обучения для агрегации знаний от парка двигателей без передачи конфиденциальных телеметрических данных, а также с созданием цифровых двойников для прогнозирования остаточного ресурса изоляции и подшипниковых узлов в условиях нестационарных нагрузок.

Библиографический список

1. Magadán L., Suárez F.J., Granda J.C., García D.F. Low-Cost Industrial IoT System for Wireless Monitoring of Electric Motors Condition // Mobile Networks and Applications. 2023. Vol. 28. Iss. 1. P. 97-106.
2. Yuan X., He Y., Wan S., Qiu M., Jiang H. Remote Vibration Monitoring and Fault Diagnosis System of Synchronous Motor Based on Internet of Things

Technology // Mobile Information Systems. 2021. Vol. 2021. Art. ID 3456624. P. 1-10.

3. Bristi S.D., Tatha M.J., Ali M.F., Bhatti U.A., Sarker S.K. et al. A Meta-Heuristic Sustainable Intelligent Internet of Things Framework for Bearing Fault Diagnosis of Electric Motor under Variable Load Conditions // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 24. Art. 16722. P. 1-25.
4. International Organization for Standardization. ISO 20816-1:2016 Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 1: General guidelines. Geneva: ISO, 2016.
5. Nandi S., Toliyat H.A., Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors - a review // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005. Vol. 20. Iss. 4. P. 719-729.

© Лобович М.С., Ахметгалеев Э.А., Ахмадиев А.Р., 2026

УДК 629.7.036

П.В. ГОРБАТКОВ, Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ

gorbatkovsky@mail.ru, sultangareev.damir@mail.ru

Науч. руковод. – доктор техн. наук, профессор Ф.Р. ИСМАГИЛОВ

Уфимский университет науки и технологий

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР ГИБРИДНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация: в статье рассмотрены современные тенденции развития систем электроснабжения летательных аппаратов, обусловленные ростом энергопотребления бортового оборудования. Проведен анализ существующих источников электроэнергии и обоснована актуальность применения гибридных силовых установок. Представлена классификация архитектур гибридных силовых установок, включая последовательные, параллельные, последовательно-параллельные, турбоэлектрические и полностью электрические схемы. Выполнена сравнительная оценка их конструктивных особенностей, принципов работы, а также преимуществ и ограничений с точки зрения энергоэффективности, массы и сложности реализации.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, летательный аппарат, электроснабжение ЛА, архитектуры ГСУ, турбоэлектрическая система, энергоэффективность, бортовые энергетические системы.

Актуальность

Эксплуатация современных летательных аппаратов невозможна без надежных и мощных источников электроэнергии. Электроснабжение ЛА с

развитием авиационной промышленности и технологий растет в связи с отказом от вспомогательных гидравлических и пневматических энергосистем и их замену только на электрическую энергию, данный вывод можно сделать на основе множества исследований роста потребления электроэнергии бортовых систем [1][2].

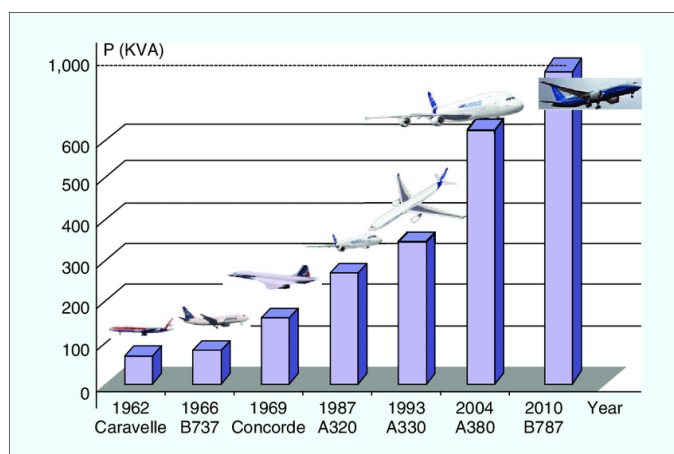


Рисунок 1 - Evolution of electrical power needs [3]

Данный график зависимости мощности вырабатываемой электроэнергии на борту самолетов от даты выпуска доказывает необходимость в эффективных источниках электроэнергии в связи с ростом потребляемой мощности. Возникает потребность в поисках источников электроэнергии.

Аккумуляторные батареи являются наиболее распространенным типом источника питания бортовых системах электроснабжения они позволяют сохранять энергию, которая может использоваться в случае отказа других источников питания. Также генераторы переменного и постоянного тока широко используются в бортовых системах электроснабжения. Они создают электрическую энергию, которая затем распределяется по всему летательному аппарату. Генераторы переменного тока используются в основном для питания электроники, а генераторы постоянного тока - для питания мощных электродвигателей и других устройств. В последнее время появилось множество новых технологий, которые могут значительно улучшить бортовую систему электроснабжения. Высокоэффективные источники питания могут уменьшить потребление энергии и увеличить продолжительность полета [4].

Одним из таких высокоэффективных источников питания является гибридная силовая установка (ГСУ).

Структура, назначение, схемы и принцип работы. Преимущества и недостатки ГСУ в составе ЛА

Летательные аппараты (ЛА) с гибридной силовой установкой (ГСУ) находят широкое применение как в гражданской, так и в военной технике. Это обусловлено рядом их существенных преимуществ, такими как бесшумность, высокая топливная эффективность и экологичность [1][5].

Гибридная силовая установка для летательных аппаратов представляет собой систему из традиционного турбореактивного двигателя, вся мощность

или часть мощности которого используется для работы электрического генератора, который в свою очередь питает электрический привод систем самолёта [5].

Принципиальные схемы и их принципы работы ГСУ

ГСУ имеет пять различных типов конструкций, отличающихся по своему строению и принципу работы: последовательные-гибридные, параллельные гибридные, последовательно-параллельные гибридные, турбоэлектрические гибридные и полностью электрические [7]. Каждая архитектура имеет свои особенности, связанные с энергоэффективностью, применение, сложность и технические проблемы [8].

Последовательная конструкция ГСУ

В последовательной гибридной конструкции, показанной на Рисунке 2, только электромоторы механически соединены с вентиляторами. Двигатель внутреннего сгорания приводит в действие электрический генератор, электрическая мощность которого приводит в действие двигатель или заряжает аккумуляторы [6]. На этапах полета, требующих малого тягового усилия, энергия, преобразуемая генератором, также может заряжать аккумуляторы. Основное преимущество этой архитектуры заключается в том, что двигатель внутреннего сгорания механически не связан с генерацией тяги и, таким образом, может постоянно работать с максимальной рабочей мощностью и скоростью. Кроме того, простота концепции позволяет легко управлять двигателем. Недостатком является то, что электромотор должен обеспечивать всю мощность двигателя самостоятельно, поэтому его необходимо настраивать индивидуально [7].

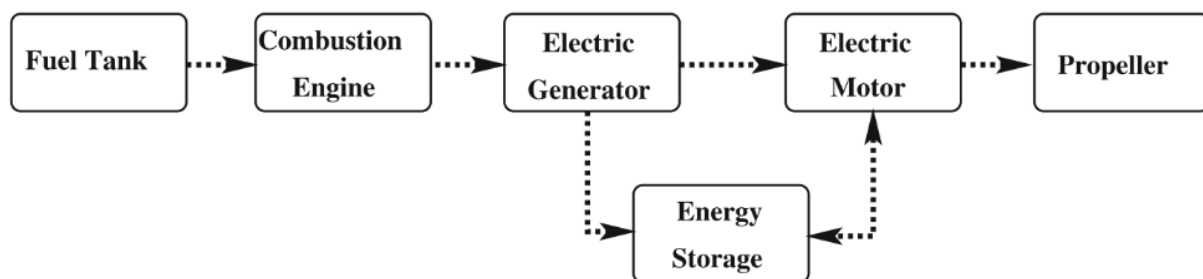


Рисунок 2 - Последовательная конструкция ГСУ

Параллельная конструкция ГСУ

В параллельной гибридной конструкции, изображенной на Рисунке 3, имеются два параллельных силовых вала, приводимых в действие от источников сгорания топлива и электричества, которые механически соединены [6]. Приводимые в действие аккумуляторами валы электромотора и ДВС соединены с валом, приводящим в движение вентилятор или пропеллер, так что один из них или оба могут обеспечивать движение. Эта гибридная архитектура также позволяет заряжать аккумуляторы, когда двигатель

внутреннего сгорания приводит в движение пропеллер и ЭМ через муфту. В этом случае ЭМ работает как электрический генератор. В отличие от серийных и последовательно-параллельных двигателей, на валу ДВС отсутствует электрогенератор, и машины могут быть меньшего размера, поскольку приводная мощность обеспечивается обоими двигателями, при соответствующем снижении веса [9]. Недостатками такой конфигурации являются дополнительная масса за счет механической муфты и необходимость в более сложной системе управления двигателем. Кроме того, работа ДВС на разных этапах полета может быть менее оптимальной, чем в серийной конфигурации, поскольку она участвует в создании тяги [10].

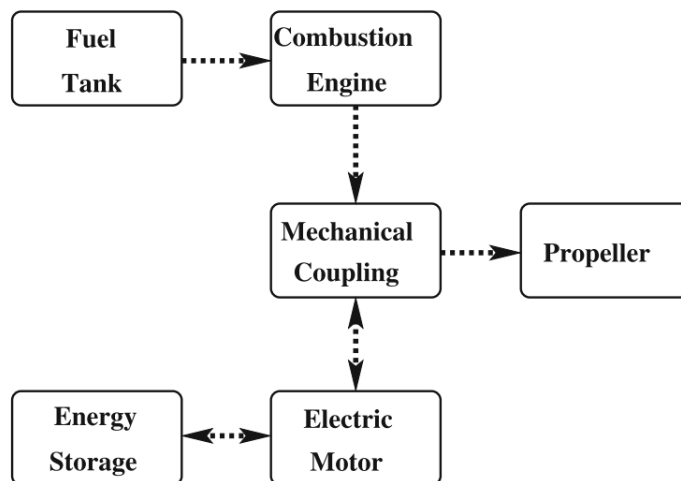


Рисунок 3 - Параллельная конструкция ГСУ

Последовательно-параллельная конструкция ГСУ

Эта конструкция представляет собой комбинацию двух описанных ранее. Как показано на Рисунке 4, ДВС, ЭМ, электрогенератор и пропеллер механически соединены посредством муфты. Таким образом, механическая энергия ДВС может использоваться для приведения в движение воздушного винта или преобразовываться в электрическую энергию с помощью генератора для зарядки аккумуляторов. Основное преимущество такой конфигурации заключается в том, что она позволяет легко менять топологию в процессе эксплуатации и является наиболее часто используемой архитектурой в гибридных автомобилях. Недостатком такой конструкции является высокий уровень сложности управления и оценка вес [11]. В некоторых концепциях тестируется вариант, в котором один или несколько вентиляторов приводятся в действие механически с помощью ДВС, в то время как другие - исключительно с помощью ЭМ, которые питаются от аккумуляторной батареи или от электропривода ДВС [6].

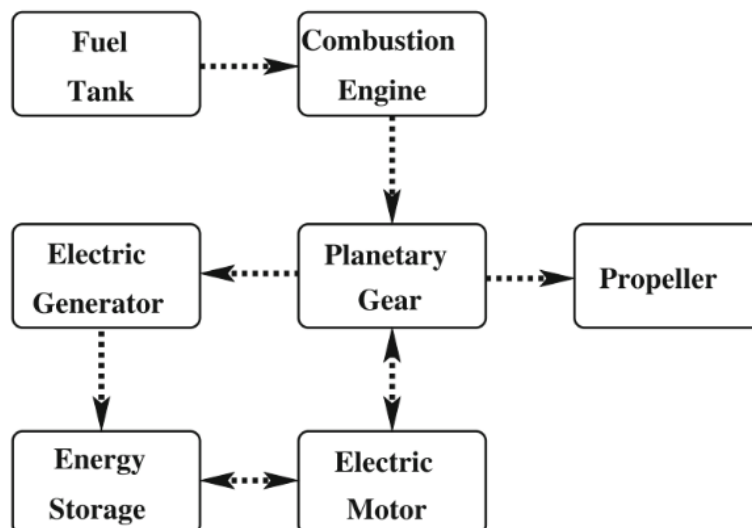


Рисунок 4 Последовательно-параллельная конструкция ГСУ

Турбоэлектрическая конструкция ГСУ

На рисунке 5 изображена турбоэлектрическая конструкция ГСУ. Эта конструкция аналогична последовательной схеме подключения, но в ней не используются аккумуляторы для получения энергии от двигателя, и в некоторых концепциях ГСУ она используется из-за низкой мощности двигателя. ДВС приводит в движение электрический генератор, ЭМ вентилятор или пропеллер. Вся энергия поступает из топлива, и никаких дополнительных устройств накопления энергии не требуется [12]. Таким же образом, как и последовательная конструкция, отсоединяя движущую силу ДВС использование устройств, создающих электромагнитную тягу, обеспечивает более высокую производительность силовой установки и гибкость конструкции самолета. Двигатели внутреннего сгорания могут работать в условиях, близких к их максимальной эффективности в зависимости от мощности и скорости, и могут быть расположены в оптимальных местах самолета [13]. Эта конструкция хорошо сочетается с концепциями, в которых мощность распределяется между несколькими вентиляторами с электромагнитным приводом, расположенными таким образом, чтобы обеспечить синергетическую интеграцию в корпусе самолета, а также со сверхпроводящими электрическими системами. Потери мощности при преобразовании энергии из механической в электрическую и в обратном направлении компенсируются распределенными вентиляторами, которые увеличивают эффективный коэффициент перепуска при одновременном снижении коэффициента давления вентилятора [12]. Полностью турбоэлектрическая архитектура использует всю мощность от ДВС для выработки электрической энергии. Частично турбоэлектрический-это вариант, при котором двигатель ЭМ обеспечивает часть тяговой мощности, а остальная часть вырабатывается турбовентилятором с механическим приводом от Турбовентиляторы с ДВС-приводом. Таким образом, размеры электрических

компонентов могут быть уменьшены при соответствующем снижении веса [7]. Преимуществом такой архитектуры является возможность использования “зеленых видов топлива”, таких как водород [11].

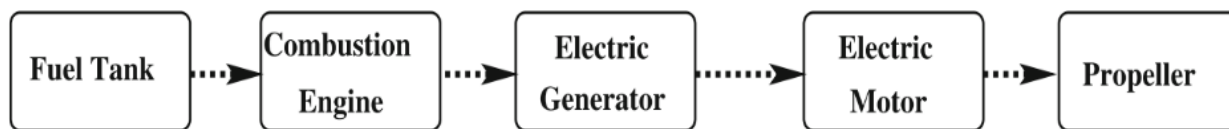


Рисунок 5 Турбоэлектрическая конструкция ГСУ

Полностью электрическая конструкция ГСУ

На рисунке 6 изображена полностью электрическая конструкция ГСУ, которая использует аккумуляторы в качестве единственного источника энергии для приведения в движение летательных аппаратов [7][12]. Преимущества заключаются в более высокой эффективности преобразования энергии ЭМ по сравнению с ДВС, а также более простые стратегии управления, необходимые для управления уникальным источником питания. Основным недостатком является низкий уровень использования современных технологий аккумуляторных батарей, что делает его непригодным для использования на большинстве самолетов. Другим недостатком является то, что, в отличие от авиационных двигателей внутреннего сгорания, которые работают вне фюзеляжа и выделяют тепло непосредственно в атмосферу, электрические устройства могут быть расположены внутри самолета, и нагрев может быть проблемой. Существующие устройства не рассчитаны на работу в таких условиях, и потребуется разработать компоненты, способные работать при более высоких температурах. Системы терморегулирования для электрических компонентов необходимы и могут быть включены в конструкцию ГСУ с соответствующим дополнительным весом [14].

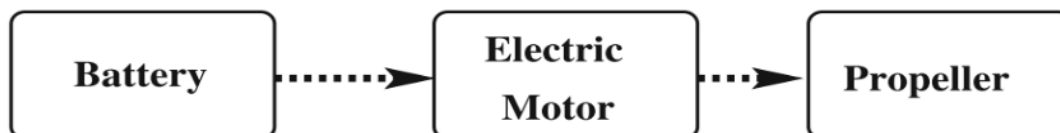


Рисунок 6 - Полностью электрическая конструкция ГСУ

Вывод

Проведённый анализ показал, что различные архитектуры ГСУ характеризуются компромиссом между энергоэффективностью, массой, сложностью реализации и эксплуатационной гибкостью. Наиболее сбалансированными являются комбинированные схемы, обеспечивающие адаптивность режимов работы, однако они требуют усложнённых систем управления. Таким образом, на современном этапе наибольшую практическую значимость имеют гибридные конфигурации, обеспечивающие оптимальное сочетание эффективности и реализуемости, при этом дальнейшее развитие

связано с совершенствованием электрических компонентов и технологий хранения и передачи энергии.

Библиографический список

1. Лёвин А. В., Халютин С. П., Жмуров Б. В. Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования // Научный вестник МГТУ ГА. 2015.
2. Volth S., Lubbe S., Bertram O. Estimating Aircraft Power Requirements: A Study of Electrical Power Demand Across Various Aircraft Models and Flight Phases. 2024.
3. Sareni B. More Electricity in the Air: Toward Optimized Electrical Networks Embedded in More-Electrical Aircraft. 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/260625582_More_Electricity_in_the_Air_Toward_Optimized_Electrical_Networks_Embedded_in_More-Electrical_Aircraft
4. Анализ состояния и тенденции развития авиационных систем электроснабжения // Молодой ученый. 2019. № 40 (278). С. 19-21. URL: <https://moluch.ru/archive/278/62848/>
5. Волченко В. Г. Гибридные и силовые установки летательных аппаратов. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46390631_36144387.pdf
6. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40313-021-00740-x>
7. Aircraft Technology Roadmap to 2050. 2020. URL: <https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2020/03/Aircraft-Technology-Roadmap-to-2050.pdf>
8. Problems and possibilities of creating very light high-performance electric drives for aviation. DOI: 10.3390/en11020344
9. Wall T. J., Meyer R. T. Hybrid electric aircraft switched model optimal control // Journal of Propulsion and Power. 2020. Vol. 36, No. 4. P. 488-497.
10. Schoemann J. Hybrid-Electric Propulsion Systems for Small Unmanned Aircraft : PhD thesis. Technical University of Munich, 2014.
11. Ehsani M., Gao Y., Gay S., Emadi A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design. Florida, USA : CRC Press LLC, 2004.
12. Welstead J., Felder J. L. Conceptual design of a single-aisle turboelectric commercial transport with fuselage boundary layer ingestion // 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2016. P. 1027.
13. Kim H. D., Brown G. V., Felder J. L. Distributed Turboelectric Propulsion for Hybrid Wing Body Aircraft // International Powered Lift Conference Royal Aeronautical Society. London, 2008. P. 22-24.
14. Rajashekara K. Power Conversion Technologies for Automotive and Aircraft Systems // IEEE Electrification Magazine. 2014.

© Горбатков П.В., Султангареев Д.У., 2026

А.Л. ГОРУСТОВИЧ

gorustovichal@uust.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Д.В. МАКСУДОВ

Уфимский университет науки и технологий

ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЁТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Аннотация: в статье представлен обзор методов расчёта установившихся режимов электрических сетей, включая методы прямого аналитического расчёта для разомкнутых и замкнутых сетей, а также универсальные матричные и итерационные алгоритмы, такие как метод узловых напряжений и метод Ньютона-Рафсона. Показана эволюция методов от простых формул до численных алгоритмов, лежащих в основе промышленного программного обеспечения.

Ключевые слова: электрические сети, установившийся режим, метод узловых напряжений, метод Ньютона-Рафсона, матрица проводимостей, программное обеспечение.

Расчёт установившихся режимов электрических сетей является одной из ключевых задач в теории и практике электроэнергетики [2]. Цель такого расчёта - определение напряжений в узлах, потоков активной и реактивной мощности на участках сети, потерь мощности и электроэнергии [2, 4]. Точность этих расчётов напрямую определяет надёжность, экономичность и безопасность функционирования энергосистемы [1, 2].

Актуальность темы обусловлена усложнением структуры современных электроэнергетических систем, включающих распределённую генерацию, FACTS-устройства и протяжённые линии электропередачи [1, 2]. Это предъявляет повышенные требования к методам анализа режимов [2].

Классификация методов расчёта

Методы расчёта установившихся режимов можно классифицировать по двум основным признакам: по типу сетевой конфигурации и по используемому математическому аппарату [2].

По типу конфигурации выделяют:

- разомкнутые радиальные сети с единственным источником питания [2, 4];
- замкнутые сети, включая кольцевые сети и сети с двусторонним питанием [2];
- сложнзамкнутые сети, характерные для реальных энергосистем с сотнями и тысячами узлов [1, 2].

По математическому подходу различают:

- прямые последовательные методы для ручного расчёта простых сетей [2, 4];
- методы на основе решения систем линейных и нелинейных уравнений, включая метод контурных уравнений и метод узловых напряжений [1, 2];
- численные итерационные методы, в том числе метод Ньютона-Рафсона и его модификации [1, 2].

Методы прямого аналитического расчёта для сетей простой конфигурации

Для разомкнутых сетей применяются два подхода: расчёт «по данным конца» и расчёт «по данным начала» [2, 4]. Метод «по данным конца» используется на этапе проектирования, когда известна нагрузка и желаемое напряжение у потребителя [4]. Расчёт ведётся от удалённой нагрузки к источнику с последовательным определением потерь мощности по формуле [2, 4]:

$$\Delta S = \frac{(P_{\text{кон}}^2 + Q_{\text{кон}}^2)}{U_{\text{кон}}^2 \cdot (R + jX)}$$

и падения напряжения по приближённой формуле:

$$\Delta U = \frac{(P_{\text{нач}} \cdot R + Q_{\text{нач}} \cdot X)}{U_{\text{ном}}}$$

Метод «по данным начала» применяется для анализа существующей сети при известном напряжении источника [2]. Он выполняется в два этапа: прямой ход (определение мощностей при номинальном напряжении) и обратный ход (уточнение напряжений) [2, 4].

Для замкнутых сетей ключевым ручным методом является метод контурных уравнений (метод «уравнительного перетока») [2]. Суть метода: мысленный разрез сети в точке потокораздела, расчёт каждого плеча как разомкнутой линии, выявление небаланса мощностей и итерационное введение уравнительного перетока до достижения сходимости [2].

Универсальные матричные и итерационные методы

Для расчёта сложных сетей применяется метод узловых напряжений (МУН) [1, 2]. Система уравнений по первому закону Кирхгофа записывается в матричной форме [2]:

$$I = Y_{\text{узн}} \cdot U$$

где I - вектор узловых токов, U - вектор узловых напряжений, $Y_{\text{узн}}$ - матрица узловых проводимостей [2]. Диагональный элемент Y_{ii} равен сумме проводимостей всех ветвей, подключённых к i -му узлу; недиагональный Y_{ij} - взятой со знаком «минус» проводимости ветви между узлами i и j [2].

Поскольку в реальных задачах заданы мощности, а не токи, возникает нелинейность:

$$I_i = \left(\frac{(P_i + jQ_i)}{U_i} \right)^*$$

Для решения нелинейной системы используется метод Ньютона-Рафсона. На каждой итерации вычисляются невязки мощностей ΔP_i и ΔQ_i , формируется матрица Якоби J, и решается линейная система:

$$J \cdot [\Delta \delta, \Delta U]^T = [\Delta P, \Delta Q]^T$$

Поправки прибавляются к текущим значениям углов и модулей напряжений. Процесс повторяется до тех пор, пока невязки не станут меньше заданной погрешности. Квадратичная сходимость метода делает его промышленным стандартом.

Современное программное обеспечение

Комбинация метода узловых напряжений и метода Ньютона-Рафсона реализована в большинстве профессиональных программных комплексов:

- *DIgSILENT PowerFactory* - мировой лидер в области моделирования энергосистем;
- *RastrWin3* - основной комплекс для расчёта и оптимизации режимов ЕЭС России.

Результаты расчётов установившихся режимов служат основой для проверки оборудования, оптимизации режимов (минимизации потерь), а также для последующих расчётов токов короткого замыкания и устойчивости.

Заключение

Прослежена эволюция методов расчёта - от простых ручных методик до автоматизированных численных алгоритмов. Ключевым достижением стало внедрение метода Ньютона-Рафсона, который благодаря высокой скорости сходимости лежит в основе всех современных СПР. Глубокое понимание этих методов необходимо инженерам-энергетикам для эффективной профессиональной деятельности.

Библиографический список

1. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст] / В. А. Веников, А. А. Глазунов. - 5-е изд. - М. : Высшая школа, 2020. - 536 с.
2. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети [Текст] : учебник для вузов / В. И. Идельчик. - М. : Энергоатомиздат, 2023. - 696 с.
3. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах [Текст] / С. А. Ульянов. - М. : Энергия, 2021. - 320 с.
4. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / А. А. Федоров, В. В. Каменева. - 4-е изд. - М. : Энергоатомиздат, 2020. - 328 с.

© Горустович А.Л., 2026

М.В. ИВАНОВ, М.О. ГОРЮХИН

r.miv@bk.ru, gorukhinmo@uust.ru

Науч. руковод. – доктор техн. наук, профессор Ф.Р. ИСМАГИЛОВ

Уфимский университет науки и технологий

МОДУЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ СУДОВ И АППАРАТОВ: ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Аннотация: статья посвящена анализу возможностей применения модульных электрических машин в подводных судах и аппаратах. Показано, что модульность в подводной технике приобретает двойной смысл: как модульность самой электрической машины и как модульность сменного движительного блока в составе платформы. Рассмотрены требования к подводным приводам: высокая удельная мощность, малые габариты, герметичность, низкий уровень вибраций, повышенная надежность, устойчивость к внешнему давлению и ограниченные возможности полевого ремонта

Ключевые слова: подводный аппарат, модульная электрическая машина, многофазный привод, отказоустойчивость.

Введение

В подводной технике электрическая машина давно перестала быть только источником вращения гребного винта. В современных подводных судах и аппаратах она является частью интегрированного электродвижительного комплекса, тесно связанного с корпусной компоновкой, энергетическим накопителем, системой охлаждения, алгоритмами навигации и требованиями к акустической скрытности. Поэтому вопрос модульности здесь трактуется шире, чем в надводном судостроении: модульным может быть не только сам двигатель, но и весь движительный блок, включая преобразователь, датчики, канал охлаждения, винтовой модуль и интерфейс подключения к бортовой сети [1; 10; 11].

Требования к электрическим машинам подводных платформ

Подводная эксплуатация формирует уникальный набор требований. Электрическая машина должна обеспечивать высокий удельный момент при малом объеме, быть совместимой с герметичной, заливной или частично заливной конструкцией, обладать низким уровнем вибрации и электромагнитного шума, а также сохранять ресурс при циклическом изменении давления и температуры. В отличие от надводных судов, где возможен доступ сервисного персонала, большинство подводных платформ

должны выдерживать длительную автономную работу без вмешательства оператора [2-5].

- минимизация акустической сигнатуры и пульсаций момента;
- устойчивость к внешнему гидростатическому давлению и коррозионной среде;
- высокая герметичность и надежность гермовводов;
- эффективный теплоотвод в условиях ограниченной циркуляции среды внутри корпуса;
- совместимость с бортовыми накопителями энергии и ограниченным энергетическим бюджетом;
- предсказуемое поведение привода при деградации одной секции или фазной группы.

Формы модульности в подводной электрической движительной установке

В подводных судах и аппаратах можно выделить три уровня модульности. Первый уровень - модульность электрической машины как совокупности секций статора, ротора, фазных групп и каналов охлаждения. Второй уровень - модульность приводного блока, когда двигатель, преобразователь и датчики объединяются в сменный узел. Третий уровень - модульность платформы, при которой несколько одинаковых движительных блоков формируют распределенную тяговую систему [10-12].

Таблица 1 - Уровни модульности в подводном электродвижении

Уровень	Содержание	Преимущества	Основные риски
Машина	Секционированный статор, многофазность, локальное охлаждение	Отказоустойчивость, гибкость управления	Локальный перегрев, усложнение герметизации
Приводной блок	Двигатель, преобразователь и датчики в одном модуле	Быстрая замена, унификация платформы	Рост массы модуля, усложнение ремонта на уровне компонентов
Платформа	Несколько одинаковых движительных модулей на аппарате	Миссионная адаптивность и резервирование	Сложная координация тяги и энергопотребления

Наиболее перспективной представляется комбинация первого и второго уровней, когда электрическая машина внутри сменного подводного модуля сама является многофазной и секционированной. Тогда отказ отдельной части

не приводит к полной потере хода, а модуль после завершения задачи может быть быстро заменен или модернизирован [1; 11; 12].

Перспективные типы модульных машин для подводных судов и аппаратов

Для подводной сферы наиболее привлекательны малошумные синхронные машины с постоянными магнитами, многофазные машины с сосредоточенными обмотками, ободные и интегрированные движительные электродвигатели, а также герметичные или заливные конструкции. Их достоинство заключается в высокой удельной мощности и возможности точного управления моментом при малых скоростях [1; 8; 9]. Для больших подводных платформ интерес представляют масштабируемые модульные двигатели с постоянными магнитами, позволяющие формировать линейку по мощности на единой технологической базе [10].

- многофазные синхронные двигатели с постоянными магнитами (PMSM) для малошумной и отказоустойчивой работы [1; 9];
- герметичные двигатели прямого привода для компактных винтовых модулей [6; 7];
- ободные и бесступичные решения для специальных движителей и маневровых систем;
- модульные электродвигатели с интегрированным жидкостным охлаждением для AUV/UUV [2-5];
- масштабируемые платформы двигателей с постоянными магнитами для подводных судов средней мощности [10].

Следует подчеркнуть, что модульность в подводной технике не сводится к простому делению машины на секции. Она должна проектироваться с учетом давления, герметичности, требований к демпфированию вибраций и ограничений по центровке движителя. Поэтому даже перспективные многофазные решения нуждаются в специальной оптимизации геометрии корпуса, подшипниковых опор и тепловых каналов [6; 7; 10].

Ключевые преимущества модульных решений

- резервирование тяги и сохранение остаточной работоспособности после частичного отказа;
- адаптация подводной платформы под различные задачи путем замены движительного модуля;
- упрощение модернизации электроники и алгоритмов управления без переработки всей машины;
- снижение совокупного времени сервисных операций на берегу;
- возможность поэтапного наращивания мощности и числа движителей в распределенной схеме;

- более гибкая интеграция диагностических средств, включая температурные, вибрационные и токовые сенсоры.

Для малых и средних автономных аппаратов дополнительным преимуществом становится технологическая повторяемость. Наличие стандартного моторно-двигательного модуля позволяет строить семейство аппаратов с общими узлами, сокращая затраты на разработку и тестирование [11; 12]. В условиях быстро меняющихся требований со стороны инспекции морской инфраструктуры, научных задач и специальных применений это преимущество имеет не только инженерный, но и рыночный характер.

Ограничения и барьеры внедрения

Главным ограничением для модульных машин в подводной среде остается теплоотвод. Герметичный корпус, малые габариты и ограниченный обмен теплом с окружающей водой создают условия, при которых даже локальная перегрузка одной секции может привести к ускоренному старению изоляции и магнитов. Поэтому модульность без развитой тепловой модели способна ухудшить, а не улучшить надежность [2-5].

Второй барьер связан с герметичностью интерфейсов. Каждая дополнительная секция, датчик, кабель или силовой канал означает увеличение числа потенциально уязвимых мест. В наземном электроприводе это компенсируется доступностью обслуживания, но в подводной технике цена ошибки существенно выше. Отсюда вытекает требование к интеграции модульности с безразъемными или высоконадежными интерфейсами и к широкому использованию встроенной диагностики [6; 7; 12].

Таблица 2 - Соотношение преимуществ и ограничений модульной машины в подводной технике

Критерий	Положительный эффект	Потенциальный компромисс
Надежность	Работа с деградацией и резервирование секций	Большее число интерфейсов и компонентов
Акустика	Тонкая настройка момента и гармонического состава	Риск дополнительных источников вибрации при плохой стыковке модулей
Тепловой режим	Локальный контроль температуры	Неравномерность нагрева и сложность отвода тепла
Обслуживание	Замена приводного модуля на берегу	Рост стоимости и сложности самого модуля
Масштабируемость	Формирование семейства аппаратов	Необходимость стандартизации интерфейсов и ПО

Направления дальнейших исследований

Развитие модульных электрических машин для подводных судов и аппаратов должно опираться на междисциплинарный подход. Недостаточно оптимизировать только магнитную систему; требуется одновременно учитывать акустику, тепловой режим, гидродинамику движителя, особенности материала корпуса и бортовую энергетику [1; 2; 5].

- создание малошумных многофазных машин с контролируемой деградацией момента;
- внедрение цифрового двойника для прогноза теплового и вибрационного состояния модуля;
- использование распределенной диагностики и алгоритмов самоадаптации управления;

Заключение

Модульные электрические машины и модульные движительные блоки обладают значительным потенциалом для подводных судов и аппаратов. Они особенно перспективны там, где критичны гибкость конфигурации, низкая заметность, отказоустойчивость и ускоренная модернизация. В отличие от надводных судов, в подводной технике модульность должна проектироваться как элемент всей архитектуры выполнения задач, а не только как удобство сборки двигателя [1; 10-12].

Наиболее вероятный путь практического внедрения состоит в развитии унифицированных герметичных или частично интегрированных движительных модулей с многофазными машинами на постоянных магнитах, встроенной диагностикой и цифровой поддержкой жизненного цикла. При этом успех технологии будет зависеть от того, насколько разработчикам удастся согласовать требования к тепловому режиму, герметичности, виброакустике и надежности межмодульных интерфейсов [1; 5; 10].

Библиографический список

1. Singh A., Khosla A. A survey and analysis of multiphase electric propulsion motors and associated controllers for driving underwater platforms // Propulsion and Power Research. 2025. Vol. 14, no. 2. P. 304-321. DOI: 10.1016/j.jprr.2025.06.001 (дата обращения 28.04.2026).
2. Ou H., Hu Y., Tian W., Mao Z., Cheng B., Li B. Investigation of self-adjusting cooling system for the autonomous underwater vehicle propulsion motor // Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 238. Article 121972. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121972 (дата обращения 28.04.2026).
3. Chen W., Mao Z., Tian W. Water cooling structure design and temperature field analysis of permanent magnet synchronous motor for underwater unmanned vehicle // Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 240. Article 122243. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122243 (дата обращения 28.04.2026).
4. Cheng B., Qin D., Hu Z. Research on the propulsion motor cooling by the coupled flow field of unmanned underwater vehicles // Applied Thermal Engineering.

2024. Vol. 237. Article 121797. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121797 (дата обращения 28.04.2026).
5. Tian W., Zhang C., Mao Z., Cheng B. Optimization of a Dual-Channel Water-Cooling Heat Dissipation System for PMSM in Underwater Unmanned Vehicles Using a Multi-Objective Genetic Algorithm // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, no. 12. Article 2133. DOI: 10.3390/jmse12122133 (дата обращения 28.04.2026).
 6. Li Y., Hu Y., Guo Y., Song B., Mao Z. Analytical Modeling and Design of Novel Conical Halbach Permanent Magnet Couplings for Underwater Propulsion // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, no. 3. Article 290. DOI: 10.3390/jmse9030290 (дата обращения 28.04.2026).
 7. Li Y., Hu Y., Song B., Mao Z., Tian W. Performance Analysis of Conical Permanent Magnet Couplings for Underwater Propulsion // Journal of Marine Science and Engineering. 2019. Vol. 7, no. 6. Article 187. DOI: 10.3390/jmse7060187 (дата обращения 28.04.2026).
 8. Liu G., Qiu G., Shi J., Zhang F. Study on Counter-Rotating Dual-Rotor Permanent Magnet Motor for Underwater Vehicle Propulsion // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. Vol. 28, no. 3. P. 1-5. DOI: 10.1109/TASC.2018.2802482 (дата обращения 28.04.2026).
 9. Singh A., Khosla A. Modelling and Simulation of a 3MW, Seventeen-Phase Permanent Magnet AC Motor with AI-Based Drive Control for Submarines Under Deep-Sea Conditions // Energies. 2025. Vol. 18, no. 15. Article 4137. DOI: 10.3390/en18154137 (дата обращения 28.04.2026).
 10. Pape A. Siemens unveils new FLEX PM modular submarine propulsion motors // Janes. 20 May 2019. URL: [janes.com](https://www.janes.com) (дата обращения 28.04.2026).
 11. Allotta B., Costanzi R., Gelli J., Pugi L., Ridolfi A. Design of a Modular Propulsion System for MARTA AUV // OCEANS 2015 - Genova. 2015. P. 1-7. DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271397 (дата обращения 28.04.2026).
 12. Wright M., Xiao Q., Dai S., Post M., Yue H., Sarkar B. Design and development of modular magnetic bio-inspired autonomous underwater robot - MMBAUV // Ocean Engineering. 2023. Vol. 273. Article 113968. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113968 (дата обращения 28.04.2026).

© Иванов М.В., Горюхин М.О., 2026

Д.В. КОБЗОВ, Ф.С. ХАМЗИН, М.В. ИВАНОВ

kobzovdan@yandex.ru, hamzinfan@yandex.ru, r.miv@bk.ru

Науч. руковод. – доктор техн. наук, профессор Ф.Р. ИСМАГИЛОВ

Уфимский университет науки и технологий

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕССОВАННЫХ КАТУШЕК В МОДУЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЕ

Аннотация: актуальность темы определяется тем, что модульная архитектура облегчает производство предварительно сформированных катушек, а также повышает ремонтпригодность и отказоустойчивость электропривода. Вместе с тем применение прессованных катушек требует оценки не только их электромагнитных и тепловых преимуществ, но и влияния процесса уплотнения на состояние изоляции, ресурс обмотки и величину переменных потерь при высоких частотах [5-9].

Ключевые слова: прессованные катушки, модульная электрическая машина, теплопроводность обмотки, предварительно сформированные катушки.

Введение

В современных электрических машинах, ориентированных на повышение удельной мощности, энергоэффективности и надежности, все более важным становится совершенствование конструкции обмотки. Одним из перспективных решений является применение прессованных катушек, позволяющих повысить коэффициент заполнения паза, интенсифицировать отвод тепла от проводника к магнитопроводу и снизить активные потери. Особенно перспективно применение этой технологии в модульных электрических машинах, где статор состоит из отдельных функционально автономных секций, а катушки часто изготавливаются и устанавливаются по отдельности [1-4].

Предпосылки применения прессованных катушек в модульных машинах

Модульная электрическая машина конструктивно хорошо подходит для внедрения прессованных катушек, поскольку отдельные зубцы или секции статора допускают предварительное изготовление катушки вне магнитопровода с последующей сборкой модуля. Такой подход уже реализовывался в машинах с сегментированным или составным статором, где сначала изготавливалась катушка с высоким коэффициентом заполнения, а затем выполнялась сборка магнитной системы [2, 6].

В работах по авиационным и тяговым машинам показано, что применение предварительно сжатых катушек позволяет существенно увеличить коэффициент заполнения паза - до уровней более 75 % [2, 7], а в отдельных

исследованиях - и выше. Это особенно важно для модульных конструкций, поскольку каждая секция должна обеспечивать высокий удельный момент при ограниченном объеме и одновременно сохранять стойкость к перегреву в аварийных и перегрузочных режимах [2, 3, 7].

Дополнительным преимуществом является технологическая совместимость прессования с сегментированными статорами. В таких системах проще контролировать форму катушки, положение проводников и усилие уплотнения, чем в случае цельного статора с труднодоступными пазами. Следовательно, модульная архитектура не только допускает, но и в определенной степени стимулирует использование прессованных катушек [3, 5].

Преимущества прессованных катушек

Основное преимущество прессованных катушек заключается в увеличении коэффициента заполнения паза проводником. Рост заполнения приводит к уменьшению активного сопротивления обмотки и, как следствие, к снижению потерь I^2R . Одновременно возрастает эквивалентная теплопроводность обмотки, поскольку уменьшается доля воздушных включений и улучшается теплопередача от проводника к зубцу статора [1, 4, 8].

Для модульных электрических машин это дает двойной эффект. С одной стороны, повышается предельная нагрузочная способность отдельного модуля за счет снижения перегрева. С другой - улучшаются условия тепловой изоляции между модулями, поскольку локальный нагрев становится менее интенсивным. В исследованиях по высокоплотным обмоткам отмечено, что рост коэффициента заполнения паза способен заметно снизить температуру наиболее горячих зон и расширить рабочую область машины [1, 4].

Существенное значение имеет и пропитка. Для уплотненных обмоток показано, что пропитка эпоксидным составом или другими пропиточными материалами дополнительно повышает поперечную теплопроводность и стабилизирует геометрию катушки. Следовательно, на практике максимальный эффект от прессованных катушек достигается не только за счет механического уплотнения, но и за счет правильного выбора системы пропитки и межвитковой изоляции [8].

Конструктивная совместимость с модульной архитектурой

Наиболее рациональной областью применения прессованных катушек являются модульные машины с сосредоточенными обмотками на отдельных зубцах. В таких машинах катушка может быть сформирована, уплотнена и изолирована до окончательной сборки модуля. Это позволяет избежать протягивания жестко деформированной катушки через узкое пазовое окно и тем самым уменьшить риск повреждения изоляции [2, 6].

Кроме того, сегментированная конструкция статора облегчает замену поврежденных секций и повышает ремонтпригодность. Если катушка изготавливается как законченный узел, модуль можно рассматривать как

стандартизированный элемент электрической машины. Такой подход особенно привлекателен для отказоустойчивых и высоконадежных приводов, где важна локализация дефекта и возможность восстановления работоспособности без полной разборки изделия [3, 4].

Ограничения и риски применения

Несмотря на явные преимущества, применение прессованных катушек связано с рядом ограничений. Наиболее серьезный риск обусловлен воздействием усилия прессования на изоляционную систему. После достижения критического уровня коэффициента заполнения наблюдается ухудшение характеристик пазовой изоляции и возрастает вероятность электрического пробоя [5, 9].

Второе ограничение связано с долговечностью. Термическое старение сжатых катушек может протекать быстрее из-за ослабления изоляции «виток-корпус» и локальных механических повреждений, возникших при формообразовании [7]. Следовательно, проектирование модульной машины с прессованными катушками должно выполняться не по критерию максимально возможного уплотнения, а по критерию оптимума между коэффициентом заполнения, тепловыми преимуществами и ресурсом изоляции.

Третье ограничение относится к высокочастотным режимам. Снижение DC-потерь при уплотнении не означает автоматического уменьшения AC-потерь. Если ради сохранения низкого сопротивления используется проводник большого сечения, могут возрастать потери, обусловленные скин-эффектом.

Оценка целесообразности для модульной электрической машины

С инженерной точки зрения применение прессованных катушек в модульной электрической машине следует признать целесообразным в тех случаях, когда конструкция статора допускает отдельное изготовление зубцов или секций, а рабочий режим машины ограничивается главным образом тепловым состоянием обмотки. Для тяговых, авиационных и высокомоментных приводов это условие выполняется достаточно часто. В таких системах прессованные катушки позволяют получить заметный выигрыш по удельной мощности и уменьшить массу активных материалов [2, 3, 6].

Однако внедрение данной технологии требует обязательной экспериментальной верификации. Только совокупность показателей позволяет обоснованно определить допустимый уровень уплотнения и подтвердить возможность серийного применения [5, 7, 9].

Заключение

Проведенный анализ показывает, что применение прессованных катушек в модульной электрической машине является технически возможным и во многих случаях оправданным. Модульная архитектура облегчает изготовление и монтаж предварительно уплотненных катушек, а высокий коэффициент заполнения паза обеспечивает снижение медных потерь и улучшение

теплоотвода. Наибольший эффект ожидается в машинах с сегментированным статором и сосредоточенными обмотками на отдельных зубцах.

В то же время практическая реализация требует осторожного подхода к выбору давления прессования, материала проводника, схемы пропитки и системы изоляции. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка модульных машин с прессованными катушками из многопроволочных или транспонированных проводников, сочетающих высокий коэффициент заполнения, приемлемые АС-потери и повышенную надежность изоляции.

Библиографический список

1. Ayat S., Liu H., Kulan M., Wrobel R. Estimation of equivalent thermal conductivity for electrical windings with high conductor fill factor // IEEE Transactions on Industry Applications (дата обращения 27.04.2026).
2. Groschup B., Pauli F., Hameyer K. Influence of the preformed coil design on the thermal behavior of electric traction machines // IEEE Transactions on Industry Applications (дата обращения 27.04.2026).
3. Kulan M. C., Baker N. J. Life-time characteristics of random wound compressed stator windings under thermal stress // IEEE Transactions on Energy Conversion (дата обращения 27.04.2026).
4. Kulan M. C., Baker N. J., Widmer J. D. Design and analysis of compressed windings for a permanent magnet integrated starter generator // IEEE Transactions on Industry Applications (дата обращения 27.04.2026).
5. Sell-Le Blanc F. et al. Feasibility study for enameled round copper wire compression within slots of electrical machines // IEEE Transactions on Industry Applications (дата обращения 27.04.2026).
6. Widmer J. D., Martin R., Mecrow B. C. Pre-compressed and stranded aluminium motor windings for traction motors // IEEE Transactions on Industry Applications (дата обращения 27.04.2026).
7. Widmer J. D. et al. Solar plane propulsion motors with precompressed aluminium stator windings // IEEE Transactions on Industry Applications (дата обращения 27.04.2026).
8. Siesing L., Reinap A., Andersson M. Thermal properties on high fill factor electrical windings: infiltrated vs non-infiltrated // IEEE Transactions on Industry Applications (дата обращения 27.04.2026).
9. Pauli F. et al. High torque density low voltage traction drives with pre-formed coils: evaluation of operating limitations // IEEE Transactions on Industry Applications (дата обращения 27.04.2026).

© Хамзин Ф.С., Иванов М.В., Кобзов Д.В., 2026

М.С. ЛОБОВИЧ, Э.С. АХМЕТГАЛЕЕВ, А.Р. АХМАДИЕВ
matveizagadka@gmail.com, ahmetgaleeve@gmail.com, arslan-
akhmadiev@yandex.ru

Науч. руковод. – ассистент кафедры ЭМ, Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ОЦЕНКА РЕСУРСА ИНТЕГРИРОВАННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Аннотация: предложена методология оценки остаточного ресурса интегрированного стартер-генератора на базе цифрового двойника. Описана гибридная модель, сочетающая физико-математическое описание с алгоритмами машинного обучения для прогнозирования деградации. Показано, что применение цифрового двойника повышает точность оценки технического состояния и позволяет реализовать стратегии предиктивного обслуживания.

Ключевые слова: цифровой двойник, оценка ресурса, предиктивное обслуживание, машинное обучение, модельно-ориентированное проектирование, электротепловое моделирование.

Современные авиационные двигатели оснащаются интегрированными стартер-генераторами (ИСГ), решающими ответственные задачи: осуществление запуска турбинных установок, выработку электрической энергии и поддержание стабильности бортовых сетей [1]. Ужесточение требований к безотказности авиационной техники актуализирует проблему перехода от регламентов планово-предупредительного обслуживания к предиктивным стратегиям. Перспективным решением данной задачи выступает технология цифрового двойника (ЦД), обеспечивающая синхронизацию виртуальной модели с физическим изделием на всем протяжении эксплуатационного цикла [2].

Создание ЦД для оценки ресурса ИСГ опирается на принципы модельно-ориентированного проектирования (MBD) и реализуется посредством многоуровневой архитектуры. Нижний ярус включает сенсорную инфраструктуру, осуществляющую передачу телеметрической информации (токовые параметры, напряжение, частота вращения, температурные показатели, вибрационные сигналы) в систему аккумуляции данных. Средний уровень представляет вычислительное ядро, где осуществляется синхронизация физических и данных-ориентированных моделей. Верхний уровень обеспечивает визуализацию, генерацию рекомендаций по техническому обслуживанию и интеграцию с системами управления полетом.

Фундаментальным этапом создания ЦД выступает разработка детализированной электротепловой модели (ЭТМ). Моделирование теплопереноса в статоре, роторе и силовой электронике осуществляется методом сосредоточенных тепловых сетей (LPTN), обеспечивающим высокую вычислительную эффективность при описании нестационарных температурных полей [3]. Тепловые сопротивления и емкости определяются исходя из геометрических характеристик и свойств материалов компонентов, а тепловыделение рассчитывается через учет потерь в медных обмотках, стали и полупроводниковых ключах инвертора. Динамическое изменение активного сопротивления обмоток в температурной зависимости описывается соотношением:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha(T_w(t) - T_a)),$$

где R_0 - начальное сопротивление, α - температурный коэффициент, T_w и T_a - температура обмотки и окружающей среды соответственно.

Чисто физические модели не обеспечивают полноценный учет стохастической природы износа, вариаций производственных допусков и влияния нештатных эксплуатационных режимов. В связи с этим архитектура ЦД дополняется гибридными подходами, где физическая модель обеспечивает базовую динамику, а алгоритмы машинного обучения компенсируют остаточные погрешности и моделируют деградационные процессы.

Оценка состояния изоляции обмоток и подшипниковых узлов осуществляется с применением рекуррентных нейронных сетей (RNN), в частности архитектур LSTM и GRU, эффективно выявляющих долгосрочные зависимости во временных рядах вибрации и температуры [4]. Входной вектор формируется из нормализованных сигналов тока, напряжения, угловой скорости и тепловых градиентов:

$$x_k = [I_k, V_k, \omega_k, T_k, \sigma_{v,k}]^T,$$

где $\sigma_{v,k}$ - дисперсия вибрационного сигнала на шаге k . Выходом сети является прогноз остаточного ресурса (RUL) или вероятность наступления отказоопасного состояния. Для повышения устойчивости моделей к шумам и выбросам применяется предварительная обработка данных методом адаптивного фильтра Савицкого-Голея, а также внедряются механизмы attention, динамически взвешивающие наиболее информативные участки временных последовательностей.

Оценка ресурса ИСГ в рамках ЦД реализуется посредством итеративного цикла «прогноз-коррекция». На этапе прогноза применяется расширенный фильтр Калмана (EKF) или нейросетевой регрессор для расчета текущего состояния. На этапе коррекции осуществляется обновление параметров деградационной модели на основе фактических телеметрических данных. Ключевые механизмы износа (термоциклирование паяных соединений, разрушение изоляции от частичных разрядов, усталость подшипников качения) описываются через эмпирические законы накопления повреждений (например, модель Коффина-Мэнсона для термоусталости и модель Палмгрена-Майнера

для циклических нагрузок), параметры которых калибруются в реальном времени методами байесовской оптимизации или ансамблевого обучения [5].

Существенным преимуществом предложенного подхода выступает способность адаптации к изменению профилей полета. При частых запусках в условиях низких температур или при работе с резкими бросками нагрузки алгоритмы ЦД пересчитывают матрицу ковариации состояния, что позволяет динамически корректировать прогноз RUL и избегать ложных срабатываний систем предупреждения.

Валидация цифрового двойника осуществляется без вывода реального изделия в отказоопасные режимы за счет технологии процессорного моделирования (Processor-in-the-Loop, PIL) и аппаратного моделирования (Hardware-in-the-Loop, HIL) [6]. В среде PIL управляющие алгоритмы ЦД компилируются под целевой микроконтроллер, после чего выполняется обмен данными с математической моделью объекта в реальном времени. Это позволяет оценить вычислительную задержку, устойчивость к дискретизации и корректность логики принятия решений.

Для проверки robustness системы в модель внедряются параметрические возмущения ($\pm 25\%$ вариации индуктивности, сопротивления, коэффициентов трения) и сценарии отказа датчиков (обрыв, заклинивание, дрейф нуля). Анализ демонстрирует, что гибридная архитектура ЦД сохраняет работоспособность при потере одного из датчиков температуры за счет реконструкции недостающих сигналов через корреляционные связи в нейросетевом блоке. Пороговые значения температурных градиентов и токов перегрузки, полученные в ходе сценарного моделирования, закладываются в бортовые алгоритмы защиты, что существенно снижает риск катастрофических отказов.

Разработанная методология оценки ресурса интегрированного стартер-генератора на базе цифрового двойника демонстрирует высокую эффективность в решении задач предиктивного обслуживания. Интеграция электротепловых моделей сосредоточенных параметров с алгоритмами глубокого обучения (LSTM, GRU, гибридные PINN-архитектуры) позволяет преодолеть ограничения классических физических подходов и обеспечить точный прогноз остаточного ресурса в условиях нестационарных эксплуатационных нагрузок. Применение PIL/HIL-верификации и сценарного моделирования отказов гарантирует надежность алгоритмов еще на этапе проектирования. Дальнейшее развитие направления связано с внедрением федеративного обучения для агрегации данных от парка двигателей без передачи конфиденциальной телеметрии в облако, а также с созданием стандартизированных benchmark-датасетов для сравнительной оценки алгоритмов оценки состояния.

Библиографический список

1. Masoner J.W. et al. Electrical Power Generation from Small Turbojet Propulsion Systems Using Turbine Shaft Power // AIAA Regional Student Conferences. 2023. P. 2023-72151.
2. Nardi D., Dini P., Saponara S. Electro-Thermal Model-Based Design of a Smart Latch in Automotive Systems for Performance and Reliability Evaluations // Electronics. 2025. Vol. 14. Iss. 10. P. 1962.
3. Dini P., Paolini D. Exploiting Artificial Neural Networks for the State of Charge Estimation in EV/HV Battery Systems: A Review // Batteries. 2025. Vol. 11. Iss. 3. P. 107.
4. Pawlik L. et al. Machine Learning-Driven Advancements in Electric Motorcycles: A Systematic Review // Energies. 2025. Vol. 18. Iss. 17. P. 4529.
5. Zhang X. et al. Proton Exchange Membrane Fuel Cells for Aircraft Applications: A Comprehensive Review // Hydrogen. 2025. Vol. 6. Iss. 4. P. 116.
6. Farea A. et al. Understanding physics-informed neural networks: Techniques, applications, trends, and challenges // AI. 2024. Vol. 5. P. 1534-1557.

© Лобович М.С., Ахметгалеев Э.А., Ахмадиев А.Р., 2026

УДК 621.313.13

Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ

sultangareev.damir@mail.ru

Науч. руковод. – доктор техн. наук, проф. Ф.Р. ИСМАГИЛОВ

Уфимский университет науки и технологий

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО МАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА В ИНТЕГРИРОВАННОМ СТАРТЕР- ГЕНЕРАТОРЕ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: цель настоящей статьи – провести обзор и качественную оценку эффективности применения двухфазного магнитного материала в активной части интегрированного стартер-генератора авиационного двигателя. Показано, что двухфазные магнитные материалы потенциально могут способствовать улучшению распределения магнитного потока, снижению потерь в магнитопроводе, уменьшению тепловой нагрузки и повышению удельной мощности. Вместе с тем их практическое применение требует комплексной электромагнитной, тепловой, механической и технологической оценки.

Ключевые слова: интегрированный стартер-генератор, авиационный двигатель, двухфазный магнитный материал, магнитопровод, удельная мощность, КПД, потери в стали, электромеханическая система.

Введение

Современное развитие авиационной техники характеризуется последовательным увеличением доли электрических систем на борту воздушного судна. Данный процесс связан с концепцией More Electric Aircraft, предполагающей замену части гидравлических, пневматических и механических систем электрическими приводами и бортовыми электротехническими комплексами [1]. Такой подход позволяет повысить гибкость управления энергией, упростить архитектуру отдельных подсистем и потенциально снизить эксплуатационные затраты. Однако, электрификация авиации одновременно предъявляет более жесткие требования к электрическим машинам: они должны иметь высокую удельную мощность, высокий КПД, малую массу, повышенную надежность и устойчивость к экстремальным эксплуатационным условиям. Обзоры IEEE по More Electric Aircraft и стартер-генераторным топологиям также выделяют надежность, отказоустойчивость, плотность мощности и системную интеграцию как ключевые требования авиационных электрических машин [1], [2].

Одним из наиболее важных элементов авиационной электромеханической системы является интегрированный стартер-генератор. В режиме запуска он обеспечивает раскрутку вала авиационного двигателя. После выхода двигателя на рабочий режим машина переходит в генераторный режим и обеспечивает питание бортовой электрической сети. Таким образом, один агрегат совмещает функции стартера и генератора, что позволяет уменьшить количество отдельных устройств, снизить массу и повысить компактность силовой установки [2].

Эффективность интегрированного стартер-генератора во многом определяется свойствами магнитного материала, применяемого в магнитопроводе и активной части электрической машины. Магнитная индукция, магнитная проницаемость, индукция насыщения, коэрцитивная сила, потери на гистерезис и вихревые токи непосредственно влияют на КПД, нагрев, массу и допустимую частоту вращения. В связи с этим перспективным направлением является применение двухфазных магнитных материалов, способных сочетать свойства различных магнитных фаз и обеспечивать локальную оптимизацию магнитного потока [5], [6].

В интегрированном стартер-генераторе магнитный материал оказывает влияние на несколько групп характеристик. Во-первых, он определяет способность магнитопровода проводить магнитный поток без чрезмерного насыщения. Во-вторых, от него зависят потери в стали, включающие потери на гистерезис, вихревые токи и дополнительные потери. В-третьих, свойства материала влияют на тепловой режим, так как электромагнитные потери

превращаются в тепло. В-четвертых, материал должен сохранять свойства при механических нагрузках, вибрациях и повышенной температуре.

Следовательно, выбор магнитного материала является не вспомогательной, а одной из центральных задач проектирования интегрированного стартер-генератора авиационного двигателя.

Двухфазные магнитные материалы ДММ

Под двухфазным магнитным материалом в рамках данной статьи понимается материал, в структуре которого присутствуют две фазы с различными магнитными свойствами. В зависимости от конкретной технологии это могут быть магнитомягкая и магнитотвердая фазы, магнитная и немагнитная области, фазы с различной магнитной проницаемостью, различной индукцией насыщения, различной коэрцитивной силой или различными потерями при перемагничивании.

В современных исследованиях рассматриваются, например, двухфазные мягкомагнитные листовые материалы, в которых возможно локально формировать магнитные и немагнитные области. По данным работы Huang и соавторов, двухфазные мягкомагнитные ламинаты позволяют настраивать магнитное и немагнитное состояние в требуемых зонах, что потенциально уменьшает паразитные потоки рассеяния и расширяет пространство проектных решений электрических машин [5].

Физическая сущность применения двухфазного материала заключается в управлении магнитным сопротивлением отдельных участков магнитной цепи. Если в традиционном магнитопроводе свойства материала по всему объему обычно считаются однородными, то двухфазная структура позволяет локально изменять магнитную проницаемость и насыщение. Это может быть полезно для снижения потоков рассеяния, уменьшения локального насыщения, ослабления паразитных гармоник магнитного поля и оптимизации распределения индукции в активной части машины.

К потенциальным преимуществам двухфазных магнитных материалов относятся: повышение эффективности использования магнитного потока, снижение потерь в магнитопроводе, уменьшение массы активной части, повышение термостабильности, возможность локальной оптимизации магнитной цепи и расширение возможностей электромагнитного проектирования. Однако существуют и ограничения: технологическая сложность изготовления, неоднородность свойств, необходимость точного моделирования, возможный рост стоимости, а также риск возникновения дополнительных механических напряжений на границах фаз.

Влияние магнитного материала на характеристики ЭМ

Магнитный материал влияет на работу стартер-генератора через параметры магнитной цепи. В первую очередь важна магнитная индукция в воздушном зазоре. Чем выше допустимая индукция без насыщения магнитопровода, тем больший электромагнитный момент может быть получен

при заданных размерах машины. Это особенно важно в стартерном режиме, когда требуется высокий пусковой момент.

В генераторном режиме большое значение имеют потери в стали. При высокой частоте вращения электрическая частота перемагничивания возрастает, что приводит к увеличению потерь на гистерезис и вихревые токи. В высокоскоростных электрических машинах, к которым относятся многие авиационные стартер-генераторы, учет потерь в магнитопроводе становится особенно важным. Обзоры по высокоскоростным электрическим машинам показывают, что повышение скорости вращения позволяет увеличить удельную мощность, но одновременно усиливает ограничения, связанные с потерями, охлаждением, прочностью ротора и свойствами материалов [4].

Если двухфазный магнитный материал позволяет уменьшить локальное насыщение или снизить паразитные потоки, это может привести к снижению потерь и улучшению теплового режима. Уменьшение тепловыделения, в свою очередь, снижает требования к системе охлаждения. Для авиационного применения это особенно важно, поскольку охлаждение также имеет массу и занимает объем. Исследования по тепловому управлению высокоплотными электрическими двигателями для авиации подчеркивают, что высокая удельная мощность невозможна без эффективного электромагнитного и тепломеханического совместного проектирования [9].

Таким образом, материал магнитопровода влияет на КПД, массу, нагрев, надежность и предельные режимы работы. Поэтому оценка эффективности двухфазного материала должна учитывать не один расчетный режим, а весь рабочий цикл агрегата.

Оценка эффективности применения ДММ

Эффективность применения двухфазного магнитного материала целесообразно оценивать по совокупности критериев. К основным критериям относятся: прирост КПД, снижение массы магнитопровода, рост удельной мощности, снижение тепловыделения, уменьшение потерь в стали, повышение допустимой частоты вращения, повышение надежности, технологическая реализуемость и стоимость изготовления.

Качественная оценка показывает, что двухфазный магнитный материал наиболее перспективен в тех случаях, когда в конструкции стартер-генератора наблюдаются выраженные локальные насыщения, потоки рассеяния или зоны повышенных магнитных потерь. В таких условиях возможность локального изменения магнитных свойств материала может дать больший эффект, чем простая замена одной марки электротехнической стали на другую.

Таблица 1 - Сравнение традиционного и двухфазного магнитного материала для интегрированного стартер-генератора

Параметр	Традиционный магнитный материал	Двухфазный магнитный материал
Магнитная индукция	Определяется однородными свойствами материала; возможны зоны насыщения	Потенциально возможно локальное управление распределением магнитного потока
Потери в стали	Зависят от частоты, индукции, толщины листа и марки стали	Могут быть снижены при уменьшении потоков рассеяния и локального насыщения
Масса активной части	Снижается за счет оптимизации геометрии и выбора стали	Потенциально может быть снижена за счет более эффективного использования магнитопровода
Тепловой режим	Потери в стали и меди формируют тепловую нагрузку	Возможное снижение потерь может уменьшить тепловую нагрузку
Технологичность	Хорошо отработанные технологии штамповки, пакетирования и сборки	Более сложное изготовление, необходимость контроля фазовой структуры
Стоимость	Обычно ниже за счет массового производства	Может быть выше из-за сложности технологии и контроля качества
Надежность	Хорошо изучена в серийных машинах	Требует дополнительной проверки усталостной, тепловой и вибрационной стойкости
Влияние на удельную мощность	Ограничено насыщением, потерями и тепловым режимом	Потенциально положительное за счет снижения массы и потерь, но требует подтверждения расчетом и испытаниями

Из таблицы видно, что двухфазный магнитный материал не является универсальной заменой традиционной электротехнической стали. Его эффективность зависит от конкретной топологии электрической машины, частоты вращения, уровня магнитной индукции, системы охлаждения, технологических ограничений и требований к надежности. Наиболее обоснованным является применение такого материала в конструкциях, где локальное управление магнитным потоком позволяет уменьшить потери или снизить массу без ухудшения механической прочности.

Заключение

В статье рассмотрена эффективность применения двухфазного магнитного материала в интегрированном стартер-генераторе авиационного двигателя. Установлено, что актуальность данного направления связана с развитием More Electric Aircraft, ростом требований к удельной мощности, КПД, надежности и компактности авиационных электрических машин.

Двухфазный магнитный материал потенциально может улучшить распределение магнитного потока, снизить локальное насыщение, уменьшить потери в магнитопроводе и улучшить тепловой режим. Эти факторы могут

способствовать повышению удельной мощности и эффективности интегрированного стартер-генератора. Особенно перспективным является применение таких материалов в высокоскоростных машинах, где потери в стали, нагрев и механические ограничения существенно влияют на предельные характеристики.

Вместе с тем практическая реализация двухфазных магнитных материалов в авиационных стартер-генераторах требует комплексной проверки. Необходимо учитывать не только магнитную индукцию и магнитную проницаемость, но и коэрцитивную силу, индукцию насыщения, потери на гистерезис, вихревые токи, тепловую стабильность, механическую прочность, виброустойчивость, технологичность и стоимость изготовления.

Таким образом, эффективность применения двухфазного магнитного материала определяется не только его магнитными свойствами, но и совокупностью тепловых, механических, технологических и эксплуатационных факторов. Наиболее обоснованный путь внедрения таких материалов - комплексное проектирование интегрированного стартер-генератора с использованием метода конечных элементов, теплового и механического анализа, а также последующей экспериментальной проверки на образцах материала и стендовых прототипах машины.

Библиографический список

1. Sarlioglu B., Morris C. T. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft // IEEE Transactions on Transportation Electrification. - 2015. - Vol. 1, № 1. - P. 54-64. - DOI: 10.1109/TTE.2015.2426499 (дата обращения 28.04.2026).
2. Nøland J. K., Leandro M., Suul J. A., Molinas M. High-Power Machines and Starter-Generator Topologies for More Electric Aircraft: A Technology Outlook // IEEE Access. - 2020. - Vol. 8. - P. 130104-130123. - DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007791 (дата обращения 28.04.2026).
3. Pastra C. L., Hall C., Cinar G., Gladin J., Mavris D. N. Specific Power and Efficiency Projections of Electric Machines and Circuit Protection Exploration for Aircraft Applications // IEEE/AIAA Transportation Electrification Conference and Electric Aircraft Technologies Symposium. - 2022. - DOI: 10.1109/ITEC53557.2022.9813927 (дата обращения 28.04.2026).
4. Gerada D., Mebarki A., Brown N. L., Gerada C., Cavagnino A., Boglietti A. High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2014. - Vol. 61, № 6. - P. 2946-2959. - DOI: 10.1109/TIE.2013.2286777 (дата обращения 28.04.2026).
5. Huang S., Zou M., Zhang W., Rallabandi V., Dial L., Buresh S., Zierer J., Jassal A., Johnson F. Development of Dual Phase Soft Magnetic Laminate for Advanced Electric Machines // AIP Advances. - 2023. - Vol. 13, № 2. - Article 025021. - DOI: 10.1063/9.0000380 (дата обращения 28.04.2026).

6. Liu Y., Yang F., Han Y., Gao J., Chen D., Bai H. Modeling of Dual-Phase Composite Magnetic Material and Its Application in Transformers // *Energies*. - 2024. - Vol. 17, № 6. - Article 1354. - DOI: 10.3390/en17061354 (дата обращения 28.04.2026).
7. Krings A., Boglietti A., Cavagnino A., Sprague S. Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. - 2017. - Vol. 64, № 3. - P. 2405-2414. - DOI: 10.1109/TIE.2016.2613844 (дата обращения 28.04.2026).
8. Guo Y. G., Zhu J. G. Application of Soft Magnetic Composite Materials in Electrical Machines: A Review // *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*. - 2006. - Vol. 3, № 1. - P. 37-46 (дата обращения 28.04.2026).
9. Deisenroth D. C., Ohadi M. Thermal Management of High-Power Density Electric Motors for Electrification of Aviation and Beyond // *Energies*. - 2019. - Vol. 12, № 19. - Article 3594. - DOI: 10.3390/en12193594 (дата обращения 28.04.2026).
10. Krings A., Soulard J. Overview and Comparison of Iron Loss Models for Electrical Machines // *Journal of Electrical Engineering*. - 2010. - Vol. 10, № 3. - P. 162-169 (дата обращения 28.04.2026).
11. Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V. Design of Rotating Electrical Machines. - Chichester: John Wiley & Sons, 2008. - 512 p (дата обращения 28.04.2026).
12. Bianchi N. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements. - Boca Raton: CRC Press, 2005. - 300 p (дата обращения 28.04.2026).

© Султангареев Д.У., 2026

УДК 62-83:681.5

А.И. ТАТАУРОВ

tataurov.ai@ugatu.su

Науч. руковод. – доктор техн. наук, проф. В.Е. ВАВИЛОВ

Уфимский университет науки и технологий

СЦЕНАРНАЯ ОЦЕНКА ГИБРИДНОГО ТОКОВОГО РЕГУЛЯТОР PMSM-ПРИВОДА НА ОСНОВЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА С ОБУЧАЕМОЙ РЕЖИМНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ

Аннотация: рассмотрен гибридный токовый регулятор PMSM-привода на основе скользящего режима (SMC) с обучаемой режимной коррекцией. Коррекция вводится во внутреннее задание токового контура и не заменяет базовый робастный закон управления. По результатам моделирования PI-, SMC- и гибридного регуляторов показана целесообразность гибридного варианта для настройки компромисса между точностью, робастностью и ограничениями управления.

Ключевые слова: PMSM; электропривод; векторное управление; токовый контур; SMC; обучаемая коррекция; гибридное управление.

Введение

Синхронные машины с постоянными магнитами широко применяются в робототехнических и сервоприводных системах благодаря высокой удельной мощности, хорошим массогабаритным показателям, высокому коэффициенту полезного действия и совместимости с цифровыми алгоритмами управления [1, 2]. Для таких приводов важны точность регулирования, быстродействие, плавность формирования момента и устойчивость при изменении нагрузки.

Распространенной основой управления PMSM-приводом является векторное управление (FOC) с внутренними контурами токов и внешним контуром скорости [1, 3]. В промышленной практике внутренний токовый контур часто реализуется на основе PI-регуляторов. Этот подход хорошо изучен и эффективен в номинальных условиях, однако при параметрической неопределенности, резком изменении нагрузки и ограничении доступного напряжения качество PI-регулирования может снижаться [1, 3].

Одним из способов повышения робастности является применение управления в скользящем режиме [4, 9, 10]. SMC-регулятор способен сохранять работоспособность при внешних возмущениях и изменении параметров объекта, но его реализация требует учета ограничений по току и напряжению, дискретности управления и возможного роста интенсивности управляющего воздействия [4, 5]. В связи с этим представляет интерес гибридная структура, в которой SMC-регулятор остается основным законом управления, а обучаемая часть используется как вспомогательная режимная коррекция [6-8].

Целью статьи является изложение структуры гибридного токового регулятора PMSM-привода на основе SMC с обучаемой режимной коррекцией и оценка его поведения по результатам сценарного компьютерного моделирования.

Структура гибридного токового регулятора

Рассматриваемая система построена в структуре векторного управления PMSM-приводом [1, 3]. Внутренний контур регулирует токи во вращающейся системе координат, связанной с ротором, а внешний контур формирует задание моментной составляющей тока. В работе сопоставляются три варианта внутреннего токового управления: классическое PI-регулирование, базовый SMC-регулятор и гибридный SMC-регулятор с обучаемой режимной коррекцией.

Принципиальная особенность гибридной структуры состоит в том, что обучаемая коррекция вводится не вместо управляющего напряжения и не вместо базового закона управления. Она воздействует на внутреннее задание токового контура: SMC-регулятор продолжает формировать управляющее воздействие, а обучаемая надстройка изменяет задание, которое должно быть отработано в конкретном режиме. Такой принцип согласуется с

использованием нейросетевых структур как вспомогательных компенсаторов в системах управления PMSM [6-8].

Блок формирования признаков режима получает информацию о текущем состоянии привода: задании и фактических значениях токов, ошибке токового регулирования, скорости вращения, уровне загрузки по напряжению и характере изменения нагрузки. На основании этих данных формируется ограниченное корректирующее воздействие для внутреннего задания токового контура. Коррекция используется в режимах, связанных с нагрузочными воздействиями, параметрическим рассогласованием и изменением доступного напряжения инвертора.

Такой способ включения обучаемой части позволяет избежать полной подмены робастного закона управления. SMC-регулятор сохраняет основную роль в динамике токового контура и работе при ограничениях [4, 5, 9], а обучаемая коррекция может быть ограничена по величине, плавно введена в управление и отключена в режимах, где ее действие нежелательно. Поэтому гибридный регулятор рассматривается как расширение базового SMC-регулятора для сложных режимов работы PMSM-привода.

Организация компьютерного эксперимента

Оценка алгоритмов выполнена методом компьютерного моделирования PMSM-привода в единой структуре FOC, что соответствует практике анализа электромеханических систем и приводов переменного тока [1-3]. Для всех вариантов регулирования использовалась одна и та же модель объекта, одинаковые параметры машины и силового преобразователя, одинаковая организация задания скорости и единая программа сценариев.

Сравнение выполнено для PI-регулятора, SMC-регулятора и гибридного SMC-регулятора с обучаемой режимной коррекцией. Программа испытаний включала номинальные скоростные режимы без нагрузки, приложение внешней нагрузки, параметрическое рассогласование модели и изменение напряжения звена постоянного тока. При анализе учитывались переходные процессы скорости, токовые ошибки, перерегулирование, время установления, пиковые значения тока и интенсивность управляющего воздействия.

Результаты сценарного моделирования

В номинальных режимах без внешней нагрузки PI-регулятор демонстрирует высокое быстродействие, малую установившуюся ошибку и умеренную интенсивность управляющего воздействия.

Базовый SMC-регулятор в этой группе не обеспечивает устойчивого общего выигрыша относительно PI-регулирования, поскольку его основные преимущества проявляются при внешних воздействиях, параметрических отклонениях и ограничениях [4, 5, 9]. Гибридный вариант занимает промежуточное положение: он способен уменьшать часть недостатков базового SMC по токовой точности, но не достигает уровня PI-регулирования по

совокупности быстродействия, пульсаций и умеренности управляющего воздействия.

Следовательно, гибридный регулятор не следует рассматривать как безусловную замену PI-регулятора в простых режимах. Его целесообразно оценивать прежде всего в сценариях, где проявляются ограничения классического регулирования и становятся существенными робастные свойства SMC.

В нагрузочных режимах определяющими становятся способность системы сохранять скорость, ограничивать токовые перегрузки и быстро восстанавливать требуемое состояние после действия внешнего момента. В этих условиях, согласно рисунку 1, преимущества SMC-регулятора проявляются заметнее, чем в номинальных сценариях. Базовый SMC-регулятор, как правило, обеспечивает более благоприятное поведение при провале скорости и ограничении токовой перегрузки, что соответствует назначению робастного управления [4, 5, 9, 10].

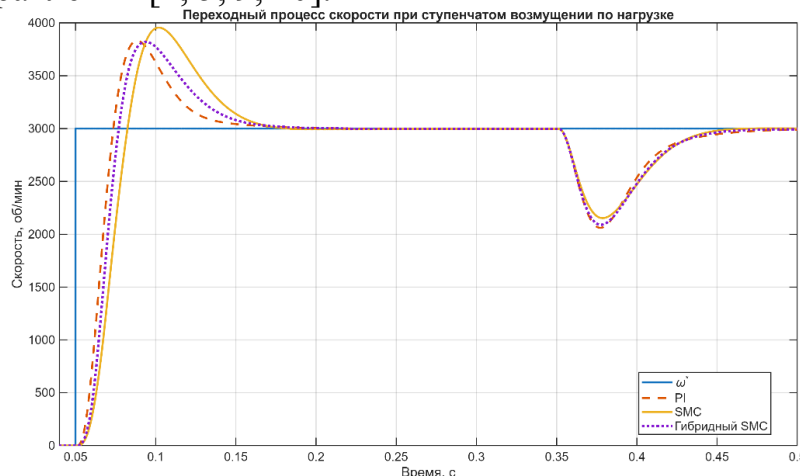


Рисунок 1 - Переходный процесс скорости PMSM-привода при нагрузочном возмущении для PI-, SMC- и гибридного токового регулятора.

PI-регулятор в рассматриваемых условиях обеспечивает достаточную точность после завершения переходного процесса, однако его способность компенсировать резкие изменения нагрузки ограничена. При скачкообразных изменениях у такой системы чаще наблюдаются заметные просадки скорости, а качество переходного процесса в большей степени зависит от вида и интенсивности внешнего воздействия.

Гибридная система управления демонстрирует промежуточный характер работы. За счёт использования базового закона скользящего режима и дополнительной режимной коррекции она позволяет улучшить отдельные показатели по сравнению с классическим PI-регулированием [4-8]. В то же время по наиболее строгим динамическим критериям такой подход не всегда оказывается эффективнее исходного SMC-регулятора. Это показывает, что обучаемый корректирующий блок не заменяет робастные свойства SMC, а выполняет вспомогательную функцию, перераспределяя соотношение между точностью регулирования, быстродействием и величиной управляющего воздействия.

При наличии параметрического рассогласования PI-регулятор может сохранять приемлемую точность в установившемся режиме, однако его динамические характеристики становятся более чувствительными к корректности выбранных настроек. Отклонения сопротивления, индуктивностей или потокосцепления двигателя способны ухудшать демпфирование, увеличивать перерегулирование и приводить к росту ошибок по токовым координатам.

SMC-регулятор обладает повышенной устойчивостью к таким неопределенностям [4, 9, 10], но может уступать PI-регулированию по отдельным показателям токовой точности и плавности.

Гибридный вариант в этой группе сценариев имеет наиболее содержательную область применения. Он позволяет сохранить часть преимуществ SMC-регулятора, связанных с робастностью, и одновременно уменьшить отдельные недостатки базового SMC по качеству токового регулирования. Подобное сочетание робастного закона управления и нейросетевой коррекции соответствует тенденции построения вспомогательных обучаемых компенсаторов для PMSM-приводов [6-8].

При снижении напряжения звена постоянного тока, согласно рисунку 2, ограничение управляющего воздействия становится одним из определяющих факторов качества регулирования. В этих условиях выбор регулятора зависит от приоритета конкретной системы: если важны динамика восстановления и согласование с ограничением инвертора, предпочтительным может быть базовый SMC-регулятор; если требуется компромисс между точностью скорости и робастной основой управления, целесообразно рассматривать гибридный вариант.

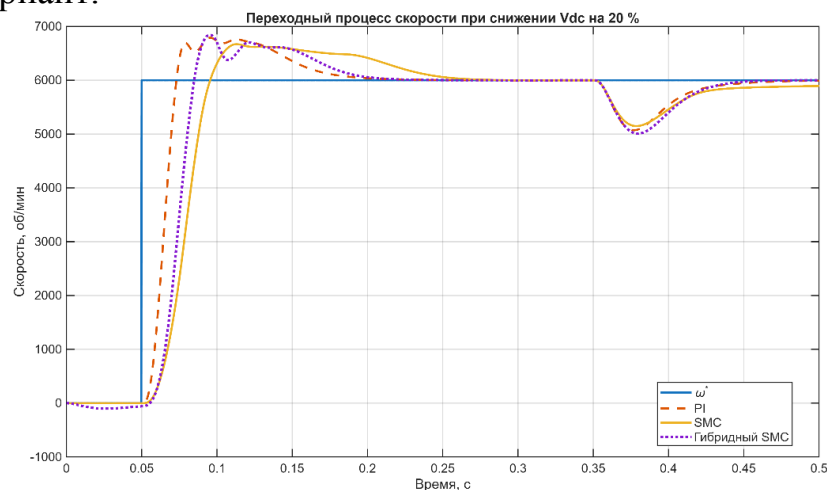


Рисунок 2 - Переходный процесс скорости PMSM-привода при изменении напряжения звена постоянного тока для PI-, SMC- и гибридного токового регулятора.

Обобщение результатов

Результаты моделирования показывают, что оценка PI-, SMC- и гибридного токового управления не может быть сведена к одной универсальной метрике. PI-регулирование наиболее эффективно в

номинальных условиях, где параметры объекта соответствуют настройкам регулятора, а внешние возмущения и ограничения выражены слабо. SMC-регулятор целесообразен в режимах, где определяющее значение имеют робастность, ограничение токовых перегрузок и устойчивость к внешним воздействиям.

Гибридный регулятор с обучаемой режимной коррекцией занимает промежуточное, но содержательно важное положение. Он не является универсально лучшим во всех режимах, однако позволяет расширить базовый SMC-регулятор дополнительным механизмом режимной адаптации [6-8]. Обучаемая часть не подменяет основной регулятор, а действует как ограниченная коррекция внутреннего задания токового контура. Благодаря этому сохраняется инженерная логика базового робастного управления и появляется возможность дополнительной настройки поведения в сложных сценариях [4, 5, 9].

При дальнейшем развитии метода необходимо учитывать, что введение обучаемой коррекции может сопровождаться ростом интенсивности управляющего воздействия. Поэтому важны ограничение амплитуды коррекции, ее плавное включение, согласование с доступным ресурсом напряжения и проверка устойчивости при дискретной реализации.

Заключение

В статье рассмотрена гибридная структура токового управления PMSM-приводом на основе регулятора скользящего режима с обучаемой режимной коррекцией. Предлагаемая структура основана на введении вспомогательной коррекции внутреннего задания токового контура без замены базового робастного закона управления.

По результатам сценарного компьютерного моделирования установлено, что в номинальных скоростных режимах классическое PI-регулирование сохраняет преимущество по совокупности быстродействия, точности и умеренности управляющего воздействия. В режимах нагрузочных возмущений, параметрической неопределенности и изменения напряжения звена постоянного тока возрастает значимость SMC-регулятора и его гибридной модификации.

Гибридный регулятор целесообразно рассматривать не как универсальную замену PI- или SMC-регулирования, а как средство настройки компромисса между точностью, робастностью и согласованием с ограничениями силового преобразователя в сложных режимах работы электропривода. Дальнейшая работа должна быть направлена на снижение интенсивности управляющего воздействия, уточнение правил включения обучаемой коррекции и экспериментальную проверку предложенной структуры на физическом стенде PMSM-привода.

Библиографический список

1. Krishnan R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. Boca Raton: CRC Press, 2010. 612 p.
2. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D., Pekarek S. D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2025. 496 p.
3. Novotny D. W., Lipo T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. Oxford: Oxford University Press, 1996. 464 p.
4. Wu L. G., Liu J., Vazquez S., Mazumder S. K. Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2022. Vol. 9, no. 3. P. 392-406.
5. Gabbi T. S., de Araujo M. B., Rocha L. R., Scalcon F. P., Gründling H. A., Vieira R. P. Discrete-time Sliding Mode Controller Based on Backstepping Disturbance Compensation for Robust Current Control of PMSM Drives // ISA Transactions. 2022. Vol. 128, pt. A. P. 581-592.
6. Yao G. et al. Study on the sensorless control method of permanent magnet synchronous motor based on self-tuned boundary layer and RBF neural network // Results in Engineering. 2025. Vol. 27. Article 105816.
7. Quynh N. V. Using radial basis function neural network for PMSM to overcome the changing load // Vietnam Journal of Science and Technology. 2021. Vol. 59, no. 2. P. 234-248.
8. Zhou Q. et al. Radial Basis Function Neural Network and Feedforward Active Disturbance Rejection Control of Permanent Magnet Synchronous Motor // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, no. 17. Article 7930.
9. Utkin V. I. Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1993. Vol. 40, no. 1. P. 23-36.
10. Slotine J.-J. E., Li W. Applied Nonlinear Control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991. 459 p.

© Татауров А.И., 2026

УДК 621.452.3

Р.И. ФАРХУТДИНОВ, Д.И. ЩЕПИН

4587540@gmail.com, i.am.nezyko@gmail.com

Науч. руковод. – ассистент кафедры ЭМ, Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В АВИАЦИОННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Аннотация: в работе изложены принципы построения, многоуровневая архитектура и технологические компоненты цифровых двойников авиационных энергоустановок. Описаны сценарии применения технологии на этапах

конструирования, испытаний, эксплуатации и технического обслуживания. Проанализированы технические, вычислительные и организационные ограничения внедрения, а также определены направления развития гибридных моделей и распределенных киберфизических сред.

Ключевые слова: цифровой двойник; авиационный двигатель; газотурбинная установка; прогнозная аналитика; интернет вещей; техническое обслуживание; жизненный цикл; моделирование.

Концепция виртуального отображения физических систем сформировалась в аэрокосмической отрасли как инструмент сопровождения сложных объектов на всех стадиях существования. Современные авиационные энергоустановки, включая газотурбинные двигатели и вспомогательные силовые агрегаты, функционируют в условиях экстремальных термодинамических нагрузок, циклических изменений режимов и жестких нормативов по надежности [1, 9]. Традиционные методики мониторинга не обеспечивают требуемой экономической эффективности и эксплуатационной безопасности. Цифровой двойник определяется как высокоточная виртуальная реплика физического актива, связанная с ним непрерывным двунаправленным обменом данными. Технология решает задачу динамической адаптации математических моделей к актуальным условиям работы [1, 5, 9]. В отличие от «цифровых теней» с однонаправленным потоком информации, рассматриваемая система обладает функцией самообучения, непрерывно обновляет параметры и формирует управляющие воздействия на основе интеграции физических моделей, операционных данных и баз знаний [5, 8]. Погрешность между поведением виртуальной модели и реального объекта в цифровой среде не должна превышать 5%, что гарантирует достоверность инженерных решений [1].

Архитектура виртуальной копии строится по иерархическому принципу, охватывая уровни от отдельных деталей, сборочных единиц и двигателя в сборе до воздушного парка [5]. Виртуальное представление объединяет взаимосвязанные модели различной детализации (от 0D до 3D), описывающие термодинамические процессы, аэродинамику проточных частей, прочностные характеристики и логику систем автоматического управления [2]. Для вычислений в реальном времени применяют методы редукции порядка, которые сохраняют требуемую точность при существенном снижении вычислительной нагрузки [4]. Обмен данными происходит через сети промышленных датчиков и телеметрические каналы, формируя замкнутый контур «физический актив - модель - сервисные модули - данные» [1, 8]. Инфраструктура объединяет интернет вещей, облачные и периферийные вычисления, обработку больших массивов данных и алгоритмы искусственного интеллекта [1, 5, 7]. Взаимодействие модулей обеспечивают протоколы MQTT 5, AMQP 1.0 и OPC UA, интегрированные в платформы типа Eclipse Ditto, где данные структурируются в формате «Things» с поддержкой API для внешних вычислительных узлов [4]. Задержки связи в контуре управления минимизируют сетями 5G/6G с ультранадежной связью, обеспечивающими

доступ 0,25-3,2 мс, а обработку на периферийных узлах выполняют через контейнеризированные сервисы и WebAssembly (Faaslets, Catalyser) [4, 5]. Структурная организация такого информационного обмена и сквозной обработки телеметрии наглядно представлена на рисунок 1.

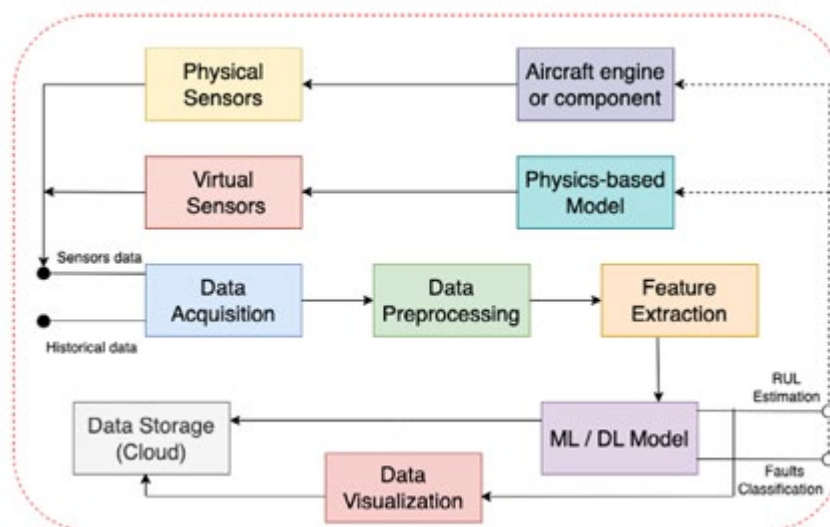


Рисунок 1 - Модульная IoT-архитектура цифрового двойника для задач мониторинга и технического обслуживания авиадвигателей [8].

На этапе проектирования цифровой двойник автоматизирует подбор геометрических параметров, конструкционных материалов и конфигурации проточной части. Многокритериальная оптимизация и виртуальные испытания сокращают объем дорогостоящих натурных экспериментов и ускоряют вывод изделия на рынок [1, 2, 9]. Интеграция моделей двигателя с имитаторами систем автоматического управления позволяет отрабатывать переходные процессы, законы регулирования и алгоритмы защиты до создания физического прототипа [2]. В разработку внедряют системы поддержки принятия решений, объединяющие термогазодинамические расчеты, прочностной анализ роторных и статорных элементов, а также базы данных свойств материалов и композиционных структур, содержащие сведения о более чем 380 сплавах и 49 композиционных материалах [2]. Применение рекуррентных нейронных сетей и моделей пониженного порядка идентифицирует характеристики конкретного экземпляра двигателя и адаптирует математическое описание под условия доводки и испытаний [2, 8].

В ходе эксплуатации двойник реализует предиктивный мониторинг и управление парком двигателей в рамках систем комплексного контроля здоровья (IVHM). Анализ отклонений термогазодинамических параметров (давления за компрессором, температуры газов перед турбиной, эффективного КПД, частот вращения роторов и уровня вибрации) выявляет эрозию, загрязнение проточной части, изменение радиальных зазоров и нестабильность горения [1, 5]. Гибридные модели, сочетающие физические уравнения и данные с датчиков, повышают точность прогноза деградации и остаточного ресурса

компонентов [5, 8]. Алгоритмы машинного обучения (LSTM, CNN, DBNN, Random Forest) распознают аномалии, классифицируют отказы и адаптируют модели к изменяющемуся техническому состоянию [5, 8]. Интеграция с архитектурой OSA-CBM стандартизирует обмен данными между уровнями сбора сигналов, обработки, диагностики и прогнозирования, переводя обслуживание на фактическое состояние оборудования [8]. Дegradацию отслеживают по коэффициентам технического состояния и методам анализа временных рядов, проверяемым по F-критерию Фишера [1].

Практика применения IoT и экспертных платформ в ТОиР

Внедрение модульной архитектуры IoT в связке с экспертными системами кардинально меняет подход к ТОиР. Вместо интуитивного планирования предприятия получают жестко обоснованные рекомендации: когда менять узлы, как закупать запчасти и на какой период закладывать простои. В итоге это выливается в осязаемое снижение операционных затрат (ОРЕХ) и страхует энергетический парк от внезапных отказов [2, 8].

Главный плюс автоматизации - это скорость реакции на ЧП и контроль сетевых потерь. Если смотреть на конкретные результаты внедрений, картина следующая:

- Электроснабжение после аварий восстанавливается в 5,5 раза быстрее.
- Технологические потери снижаются в 2,5 раза.

Для менеджмента энергокомпаний это чистая экономика: минимизация простоев напрямую конвертируется в рост выручки и увеличивает валовую прибыль [3].

Аппаратные ограничения и калибровка

Естественно, на практике всё упирается в надежность "железа". Датчики работают в жестких условиях - тут и постоянная вибрация, и экстремальные температуры, из-за чего их характеристики быстро плывут. Чтобы собирать адекватную аналитику, приходится программно компенсировать эти погрешности. Сейчас для этого гоняют алгоритмы KNN (ближайших соседей) и методы сжатого зондирования. Плюс обязательна ювелирная калибровка сенсоров, где точность доводят буквально до третьего знака после запятой. [5, 8]. Еще одним ограничением остается недостаток открытых наборов данных, отражающих полный жизненный цикл оборудования от ввода в эксплуатацию до отказа. Для преодоления этой проблемы используются синтетические данные, формируемые с помощью генеративно-состязательных сетей, а также методы репликации на основе обучения с подкреплением. [6, 8]. Интерпретируемость решений ИИ обеспечивают внедрением объяснимого искусственного интеллекта, необходимого для прохождения сертификационных процедур, где этапы включают отладку моделей, выявление смещений и создание прозрачных правил [5, 8]. Кибербезопасность поддерживают протоколы IEC 61850 с расширенной аутентификацией и федеративное обучение, обновляющее модели без передачи исходных

телеметрических массивов в центральное облако [4, 7]. Для обеспечения сквозной прослеживаемости применяют стандарты информационной модели (CIM IEC 61970/61968, SGAM, SAREF), унифицирующие форматы данных, протоколы обмена и семантику описания компонентов [4, 7]. Федерацию данных организуют через верификационные модули и графы знаний, исключаящие дублирование информации при сохранении единой схемы запросов [4, 7].

Цифровой двойник авиационной энергоустановки функционирует как киберфизическая система, где точность копии обеспечивают модели пониженного порядка, алгоритмы LSTM и DBNN, а также стандартизированные протоколы обмена. Применение ROM и граничных вычислений сокращает задержки обработки до миллисекундного диапазона, а использование CIM и федеративного обучения решает вопросы интероперабельности и безопасности. Преодоление ограничений калибровки датчиков, сертификации ИИ-моделей и создания репрезентативных наборов данных позволит внедрить автономные системы предиктивного обслуживания, снижающие количество внеплановых ремонтов на 30-40% и увеличивающие межремонтный ресурс компонентов. Модульные IoT-архитектуры с поддержкой FPGA и контейнеризации обеспечат масштабируемость решений для парков воздушных судов, а графы знаний и онтологии устранят разрозненность данных между проектированием, производством и эксплуатацией.

Библиографический список

1. Блинов, В. Л. Цифровые двойники турбомашин : учебное пособие / В. Л. Блинов, С. В. Богданец. - Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. - 162 с.
2. Ахмедзянов, Д. А. Цифровой двойник ГТД как новый уровень возможностей моделирования / Д. А. Ахмедзянов, А. Е. Кишалов, А. В. Суханов // Вестник УГАТУ. - 2026. - Т. 30, № 1(111). - С. 10-21.
3. Гвоздяный, С. Е. Российский и зарубежный опыт использования цифровых двойников в энергетике / С. Е. Гвоздяный, А. В. Мясков // Экономика промышленности. - 2024. - Т. 17, № 4. - С. 378-387.
4. Song, Z. Digital Twins for the Future Power System: An Overview and a Future Perspective / Z. Song et al. // Sustainability. - 2023. - Vol. 15, No. 6. - Art. 5259.
5. Sadeghi, A. Digital Twins for Condition and Fleet Monitoring of Aircraft: Toward More-Intelligent Electrified Aviation Systems / A. Sadeghi et al. // IEEE Access. - 2024. - Vol. 12. - P. 99806-99832.
6. Heluany, J. B. A review on digital twins for power generation and distribution / J. B. Heluany, V. Gkioulos // International Journal of Information Security. - 2024. - Vol. 23. - P. 1171-1195.
7. Thwe, M. M. Digital Twins for Power Systems: Review of Current Practices, Requirements, Enabling Technologies, Data Federation, and Challenges / M. M. Thwe et al. // IEEE Access. - 2025. - Vol. 13. - P. 105517-105540.

8. Bisanti, G. M. Digital twins for aircraft maintenance and operation: A systematic literature review and an IoT-enabled modular architecture / G. M. Bisanti et al. // Internet of Things. - 2023. - Vol. 24. - Art. 100991.
9. Yin, Z. H. Application and Development Prospect of Digital Twin Technology in Aerospace / Z. H. Yin, L. Wang // IFAC PapersOnLine. - 2020. - Vol. 53-5. - P. 732-737.

© Фархутдинов Р.И., Щепин Д.И., 2026

УДК 629.7.05:004.8

Р.И. ФАРХУТДИНОВ, Д.И. ЩЕПИН

4587540@gmail.com, i.am.nezyko@gmail.com

Науч. руковод.– ассистент кафедры ЭМ, Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ MORE ELECTRIC AIRCRAFT

Аннотация: в работе проведён систематизированный анализ вычислительных методов искусственного интеллекта, применяемых для координации энергопотоков в бортовых сетях концепции МЕА. Исследованы предиктивное моделирование нагрузок, адаптивное распределение мощности, интеллектуальное управление гибридными накопителями. Установлено, что внедрение алгоритмов глубокого обучения с подкреплением и многоагентных архитектур повышает эксплуатационную устойчивость и энергоэффективность систем.

Ключевые слова: More Electric Aircraft; искусственный интеллект; энергоменеджмент; глубокое обучение с подкреплением; интеллектуальные сети; гибридные накопители; бортовое электроснабжение; оптимизация.

Современная авиационная отрасль вступила в фазу радикальной технологической модернизации, главным направлением которой выступает поэтапная замена гидравлических и пневматических контуров на полностью электрифицированные узлы. Стратегия «более электрического самолёта» (More Electric Aircraft, MEA) подразумевает последовательный переход от традиционных гидросистем к электромеханическим приводам, интегрированным в единую цифровую среду управления [3]. Данный инновационный курс обусловлен потребностью в повышении топливной экономичности, сокращении конструкционной массы, минимизации регламентных операций и снижении экологического воздействия авиатехники.

Одновременно с этим, повсеместная электрификация бортового оборудования формирует серьёзные инженерные трудности в сфере координации энергетических потоков. Стохастическая динамика нагрузок,

непредсказуемый характер выработки вспомогательными генераторами, необходимость мгновенного реагирования и строгие нормативы живучести снижают результативность классических детерминированных регуляторов. В указанных условиях вычислительные технологии искусственного интеллекта (ИИ) открывают перспективы для разработки самоадаптирующихся и прогнозирующих управляющих контуров, способных в реальном времени оптимизировать функционирование бортовой электросети.

Практическая значимость создания ИИ-решений для авиационных платформ подтверждается следующими обстоятельствами:

1. Согласование генерации и потребления при резких изменениях полётного профиля;
2. Объединение распределённых источников энергии и накопителей в централизованную управляемую сеть;
3. Повышение эксплуатационной надёжности посредством заблаговременного выявления дефектов и гибкого перераспределения мощности;
4. Сокращение операционных издержек благодаря интеллектуальному выбору режимов работы оборудования.

Задача настоящей работы заключается в систематизированном обзоре современных методик внедрения искусственного интеллекта в контуры управления энергоснабжением самолётов концепции MEA, опирающемся на анализ актуальных научных публикаций.

Реализация архитектуры MEA строится на применении электромеханических (ЕМА) и электрогидростатических (ЕНА) актуаторов для привода механизации крыла, шасси, органов управления и вспомогательных агрегатов, что позволяет полностью исключить гидравлические магистрали, насосные станции и рабочую жидкость [3]. Электрифицированные контуры отличаются сниженными потерями при транспортировке энергии, упрощают внутреннюю компоновку фюзеляжа и гарантируют высокую точность позиционирования исполнительных механизмов. Практическое внедрение указанных решений уже реализовано в лайнерах Boeing 787, Airbus A350 и отечественном MC-21, где электроприводы постепенно замещают гидравлические цилиндры [3].

Подобная компоновка выдвигает жесткий набор требований к аппаратуре: критически важны предельная удельная мощность, строгий лимит по массе, дублирование каналов и живучесть при сильных вибрациях или температурных скачках. Но главный вызов здесь - это охлаждение. Высокомощная электроника генерирует колоссальные тепловые потоки. Сбросить эту тепловую нагрузку нужно максимально эффективно, но при этом нельзя раздувать габариты и утяжелять конструкцию, что превращается в серьезную инженерную дилемму [3].

Стандартный контур распределения энергии связывает в единую сеть разнородные источники питания [4, 5]:

- Основные генераторы, снимающие мощность напрямую с вала турбины;
- Вспомогательные силовые установки (ВСУ);

- Альтернативная генерация на базе топливных элементов;
- Буферные накопители (АКБ и высокоемкие суперконденсаторы).

Сбалансировать такую гибридную систему в реальном времени - сложнейшая задача. Контроллеру приходится одновременно просчитывать массу переменных: остаток заряда батарей (SOC), приоритетность потребителей, температурные режимы и требования безопасности. Классическая автоматика тут пасует, поэтому управление переводят на рельсы машинного обучения. Умные контроллеры анализируют ретроспективные данные о потреблении, наперед видят пики нагрузки и на лету коммутируют источники. Это не просто срезает энергопотери, но и бережет ресурс дорогого «железа» [1, 2].

Для решения специфических задач диспетчеризации привлекается целый стек интеллектуальных архитектур:

- Прогнозирование нагрузок (LSTM, GRU): Рекуррентные сети отлично предсказывают динамику потребления бортовых систем. Модели учитывают все - от конкретного этапа полета и погодных условий до действий экипажа [1, 5]. Схожим образом просчитывается и выработка от вспомогательных источников.
- Работа в условиях неопределенности (ANFIS): Адаптивные нейро-нечеткие регуляторы незаменимы в стохастических средах. За счет грамотного манипулирования буферными накопителями и упреждающего прогноза генерации, ANFIS позволяет срезать пиковые перегрузки в сети ровно наполовину (на 50%) [2, 4].
- Поиск управляющих стратегий (DRL): Алгоритмы глубокого обучения с подкреплением берут на себя генерацию оптимальных сценариев управления, адаптивно подстраиваясь под мгновенные изменения обстановки.

В научной литературе представлена многоагентная иерархическая система на базе алгоритма TD3, решающая задачу совместного распределения тяги и электрической мощности в гибридных самолётах. Моделирование продемонстрировало экономию условного топлива на 2,2% при сохранении 99,9% ресурса аккумуляторных ячеек [6]. Для комбинаторных задач оптимизации также успешно применяются сети Хопфилда, обеспечивающие быструю сходимость при частично-разрывных функциях топливной эффективности [2]. Для оценки состояния заряда (SoC) и степени износа (SoH) литий-ионных элементов применяются искусственные нейронные сети с сигмоидальными функциями активации, повышающие точность расчётов до 98,7% [4]. Динамическое компьютерное моделирование в средах типа SimInTech даёт возможность отрабатывать алгоритмы многокритериальной оптимизации до их загрузки в бортовые вычислители [2].

Прогностическое обслуживание на базе ИИ способно предотвратить до 90% аварийных остановок за счёт непрерывного мониторинга скорости деградации узлов и анализа телеметрии в реальном времени [1]. Интеграция технологий силовой связи по линиям электропередачи (PLC) и когнитивных

архитектур обеспечивает высокую пропускную способность бортовых сетей обмена данными [1]. Цифровые двойники энергосистемы, формируемые на основе потоковых данных, позволяют моделировать эксплуатационные сценарии, тестировать стратегии управления и прогнозировать поведение сети при отказах без проведения дорогостоящих натурных испытаний [2].

Использование цифровых моделей позволяет «обкатать» софт управления в экстремальных сценариях - например, имитируя глухое короткое замыкание или внезапный отказ основного генератора. Проводить подобные эксперименты на реальных агрегатах слишком опасно и накладно. Виртуальные стенды полностью снимают эту проблему: они кратно снижают финансовые издержки на предсертификационные испытания и помогают быстрее выкатывать новые технические решения на рынок [1, 2].

Специфика адаптации технологии Vehicle-to-Grid (V2G) к авиационной отрасли завязана на глубокой рекуперации энергии. Система собирает «лишнее» электричество в момент посадки, при торможении на полосе или за счет движения элементов механизации крыла. Сюда же относится и концепт двунаправленного энергообмена, когда самолет может отдавать или принимать мощность от наземной инфраструктуры аэропорта. Разруливать такие сложные реверсивные потоки поручают ИИ-регуляторам. Именно они в реальном времени удерживают хрупкий баланс между генерацией, сиюминутным потреблением и зарядкой накопителей [1, 4].

Главный барьер при внедрении таких интеллектуальных систем - быстродействие. Бортовые микроконтроллеры обязаны парировать любые сетевые возмущения за считанные миллисекунды, иначе автоматика просто отключится. Из-за этого классические «тяжелые» архитектуры нейросетей здесь неприменимы. Математические алгоритмы ИИ приходится подвергать жесткой оптимизации, целенаправленно урезая их вычислительную сложность под рамки жесткого реального времени.

Для этого применяются квантование, прунинг и другие методы упрощения моделей, а также обеспечивается предсказуемое, детерминированное время выполнения управляющих операций. [2, 3]. Анализ информационной безопасности показывает, что критическими векторами остаются несанкционированный доступ к телеметрии, инъекция искажённых показаний (FDIA) и атаки на доступность управляющих каналов. Решения на основе машинного обучения (алгоритмы iForest, методы опорных векторов SVM, нейросетевые системы IDPS) позволяют в реальном времени детектировать аномалии в потоках данных и нейтрализовывать скрытые угрозы [1, 2]. Авиационные нормы (DO-178C, DO-254) предъявляют жёсткие требования к верификации программного обеспечения, что стимулирует разработку объяснимого ИИ (XAI) и гибридных систем, сочетающих детерминированные алгоритмы для критически важных функций и ИИ-модели для оптимизационных задач [1, 3].

Приоритетные направления дальнейшего развития включают: применение федеративного обучения для обновления моделей без передачи

исходных данных за пределы борта; интеграцию сетей 5G и спутниковых каналов связи для синхронизации цифровых двойников с наземными диспетчерскими центрами; создание отечественных вычислительных платформ и сред имитационного моделирования для независимой верификации алгоритмов [2]; унификацию протоколов обмена данными и формирование отраслевых стандартов для ИИ-компонентов в авиации.

По результатам исследования сформулированы следующие выводы. Переход к архитектуре More Electric Aircraft объективно требует пересмотра подходов к управлению бортовыми энергосистемами. Традиционные регуляторы, базирующиеся на жёсткой логике и фиксированных сценариях, не обеспечивают необходимой гибкости и адаптивности в условиях динамических нагрузок и распределённой топологии.

Интеграция методов искусственного интеллекта - включая машинное обучение, нейросетевые архитектуры, глубокое обучение с подкреплением, адаптивные нейро-нечёткие системы и эволюционные алгоритмы - создаёт основу для интеллектуальных управляющих контуров, способных:

1. Предсказывать потребление и генерацию с высокой точностью, снижая пиковые перегрузки сети на 50%;
2. Динамически оптимизировать распределение мощности между источниками и потребителями, повышая топливную эффективность;
3. Реализовывать предиктивную диагностику и гибкое перераспределение нагрузки при отказах, предотвращая до 90% аварийных ситуаций;
4. Увеличивать ресурс накопителей за счёт интеллектуального управления циклами заряда-разряда и высокоточной оценки параметров SoC/SoH.

Практические испытания подтверждают, что применение ИИ-алгоритмов, таких как TD3, ANFIS, фреймворк IEMPS и нейросетевые оптимизаторы, позволяет сократить условный расход топлива, повысить эффективность использования водорода и снизить операционные затраты. Тем не менее, успешная интеграция требует преодоления барьеров, связанных с ограничениями реального времени, киберустойчивостью, интерпретируемостью моделей, тепловым менеджментом и соответствием авиационным стандартам.

Для прогресса в данном направлении необходимо:

- Разрабатывать специализированные бортовые вычислительные модули с гарантированным временем отклика и минимальным тепловыделением;
- Формировать нормативно-техническую базу для сертификации ИИ-компонентов, включающую требования к объяснимости и защите от кибератак;
- Активизировать междисциплинарные исследования на пересечении энергетики, искусственного интеллекта, математического моделирования и авиационного проектирования.

Реализация указанных мер позволит сформировать новое поколение авиационных энергосистем, сочетающих высокую энергоэффективность, надёжность и интеллектуальную адаптивность, что является стратегическим

приоритетом для поддержания конкурентоспособности авиационной отрасли в обозримой перспективе.

Библиографический список

1. Исмиева Н.Х., Исмаилова Ш.И., Мустафаева Ф.М. Интеллектуальные электроэнергетические системы с искусственным интеллектом и решениями в области энергетики будущего // Вестник науки. - 2025. - № 10(91). - Т. 2. - С. 851-864.
2. Обичкин Р.Ю., Данилов А.В., Петухов С.В., Надеин В.Ф. Применение современных технологий и методов в оптимизации систем электроснабжения // Наука и инновации. - 2023. - № 4. - С. 45-58.
3. Яковлева В.И., Сагитов Д.И. Электрические приводы в конструкции современных самолётов: от механики к электронному управлению // Авиационные технологии. - 2025. - С. 180-183.
4. Алтынбаев А.Р. Искусственный интеллект. Использование интеллектуальных систем учёта энергоресурсов в системе электроснабжения предприятия // Вестник науки. - 2024. - № 6(75). - Т. 2. - С. 2180-2190.
5. Liu Z., Gao Y., Liu B. An artificial intelligence-based electric multiple units using a smart power grid system // Energy Reports. - 2022. - Vol. 8. - P. 13376-13388.
6. He L., Chen F., Tian P., Gou H. An improved energy management strategy for hybrid electric powered aircraft based on deep reinforcement learning // Aerospace Science and Technology. - 2024. - Vol. 149. - 109137.
7. Li S., Gu C., Xu M., Li J., Zhao P., Cheng S. Optimal power system design and energy management for more electric aircrafts // Journal of Power Sources. - 2021. - Vol. 512. - 230473.
8. Fayyazi M. et al. Artificial Intelligence/Machine Learning in Energy Management Systems, Control, and Optimization of Hydrogen Fuel Cell Vehicles // Sustainability. - 2023. - Vol. 15, № 6. - 5249.

© Фархутдинов Р.И., Щепин Д.И., 2026

УДК 621.313

Ф.С. ХАМЗИН, Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ, А.Ф. ШАРАФУТДИНОВА

hamzinfan@yandex.ru, sultangareev.damir@mail.ru

Науч. руковод. – доктор техн. наук, профессор Ф.Р. ИСМАГИЛОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В МОРСКОМ СУДОСТРОЕНИИ

Аннотация: в статье рассматриваются конструктивные и эксплуатационные перспективы применения модульных электрических машин в морском судостроении. В контексте настоящей работы под модульностью понимается

архитектура машины, при которой электромагнитная, силовая, тепловая и сервисная подсистемы формируются из повторяемых функциональных секций. Показано, что переход к модульным решениям особенно востребован в системах судового электродвижения, интегрированных энергетических установках, подруливающих устройствах и низкооборотных безредукторных комплексах.

Ключевые слова: модульная электрическая машина, отказоустойчивость, интегрированная энергетическая система судна.

Введение

Электрификация морского транспорта и развитие интегрированных энергетических систем судна радикально изменили требования к электрическим машинам главного гребного и вспомогательного электродвижения [1-5]. Современный судовой привод должен обеспечивать высокий удельный момент, надежную работу при переменных режимах, низкий уровень вибраций, устойчивость к отказам и удобство сервисного обслуживания в ограниченном машинном пространстве. На этом фоне модульная электрическая машина становится не просто вариантом компоновки, а самостоятельной инженерной концепцией, позволяющей распределять активные зоны, преобразователи, контуры охлаждения и силовые секции по функциональным блокам [4, 5, 7].

Для судостроения модульность особенно важна потому, что проектирование силовой установки все чаще идет не от одной типовой машины, а от вариативной платформы. Один и тот же базовый модуль может использоваться в составе главного гребного электродвигателя, подруливающего комплекса, валогенератора или резервируемого привода. Такая унификация сокращает номенклатуру деталей, упрощает сервис и повышает технологическую гибкость верфи и изготовителя электрических машин [5, 7].

Теоретические основания модульного подхода

Под модульной электрической машиной целесообразно понимать электромеханический преобразователь энергии, в котором активная часть, силовое питание или конструктивная оболочка разделены на повторяемые секции, сохраняющие функциональную автономность при работе в составе единого привода. На практике это может выражаться в сегментированной магнитной системе, а также в распределенной силовой электронике [7].

- силовая модульность - индивидуальные или групповые преобразователи для отдельных секций статора;
- конструктивная модульность - сборка машины из повторяемых сегментов корпуса, ярма, зубцовых пакетов и каналов охлаждения;
- эксплуатационная модульность - возможность локальной замены, отключения или дерейтирования отдельного блока без полной остановки

привода либо с минимальным ограничением его функций, если это допускает архитектура системы.

Морская техника предъявляет к модульности более жесткие требования, чем наземные системы. Причина заключается в том, что отказ в море приводит не только к снижению эффективности, но и к риску потери хода, нарушения маневренности, роста динамических нагрузок на валопровод и ухудшения безопасности. Поэтому модульность должна оцениваться не абстрактно, а через категорию контролируемой деградации: машина обязана сохранить необходимый момент, а тепловое состояние не должно приводить к последующим отказам [1, 4, 5].

Конструктивные варианты модульных машин для судов

К числу наиболее перспективных для судовой сферы относятся модульные низкооборотные машины с постоянными магнитами, многофазные синхронные машины, сегментированные машины безредукторного привода, а также некоторые варианты индукционных машин с секционированной обмоткой [6-10]. Наибольший интерес вызывают конструкции, способные обеспечить большой крутящий момент без редуктора, поскольку отказ от редукторной ступени снижает шум, упрощает кинематическую цепь и уменьшает потери.

Таблица 1 - Сравнение перспективных архитектур модульных судовых машин

Тип архитектуры	Преимущества	Ограничения	Наиболее подходящие применения
Модульная PMSM прямого привода	Высокий КПД, высокий момент на низкой скорости.	Стоимость магнитов, тепловая неоднородность секций	Главная пропульсия, поды, паромы, ледовые суда
Шестифазная или девятифазная машина	Отказоустойчивость, снижение пульсаций момента, гибкость управления	Более сложный преобразователь и алгоритмы координации	Главные и вспомогательные приводы повышенной надежности
Секционированная индукционная машина	Отсутствие магнитов, высокая технологичность	Меньшая удельная мощность и момент по сравнению с PMSM	Судовые вспомогательные приводы и бюджетные решения

С практической точки зрения модульность сильнее всего проявляет себя в двух сценариях: при построении крупногабаритной машины большой мощности, которую удобнее изготавливать и транспортировать секциями, и при создании отказоустойчивого привода, где каждая фазная группа связана с отдельным преобразовательным модулем. Именно сочетание этих сценариев

делает модульные машины перспективными для судов ледового класса, паромов, исследовательских судов и судов с динамическим позиционированием [5, 7, 8].

Преимущества модульных машин в судостроении

1. масштабирование мощности без полной переработки конструкции: изменение числа секций позволяет формировать семейство машин [7];
2. повышенная живучесть привода за счет локального изолирования аварийной секции [7, 8];
3. снижение простоев за счет модульного ремонта и замены узлов по состоянию [5, 7];
4. адаптация геометрии машины к судовой компоновке [6, 9];
5. возможность сочетать разные контуры охлаждения, в том числе воздушный, жидкостный и масляный, в пределах одного семейства машин [9, 12];
6. совместимость с цифровой диагностикой, поскольку каждая секция может иметь собственный набор датчиков и цифровой профиль [11, 12].

Особое значение имеет виброакустическая составляющая работы электропривода. В судовых энергетических установках модульная конструкция позволяет изменять зубцово-пазовые комбинации и состав электромагнитных гармоник, а также применять независимое управление отдельными секциями. Это способствует снижению пульсаций электромагнитного момента и уменьшению уровня шума и вибраций. Данный фактор особенно важен для пассажирских судов, научно-исследовательских платформ и кораблей военного назначения, где акустическая малозаметность и комфорт эксплуатации относятся к числу значимых требований. [8, 9].

Ограничения и инженерные риски

Несмотря на очевидные преимущества, модульная электрическая машина не является универсально лучшим решением. При увеличении числа секций возрастает число межмодульных соединений, разъемов, датчиков и каналов преобразования энергии. Каждый такой элемент улучшает локальную обслуживаемость, но одновременно создает дополнительные точки отказа. Для морской техники, работающей во влажной, соляной и вибронагруженной среде, надежность соединений критична не меньше, чем надежность активной стали и обмоток [4, 5].

Еще один риск связан с неравномерностью теплового поля. В модульной машине соседние секции могут находиться в различных тепловых условиях из-за неодинакового охлаждения, ограниченного доступа к теплообменной поверхности и локальных перегрузок. Если алгоритм управления не учитывает эту неоднородность, возникает ситуация, когда электрически машина способна выдавать большую мощность, но тепловой ресурс отдельного модуля уже исчерпан. Следовательно, перспективное развитие невозможно без

мультифизического проектирования и цифрового двойника, который оценивает магнитные, механические и тепловые процессы совместно [11, 12].

Экономические и производственные аспекты

Для серийного судостроения модульность интересна не только с технической, но и с организационно-экономической точки зрения. Унификация секций позволяет частично стандартизировать оснастку, сократить номенклатуру пакетов стали, повторно использовать типовые катушки и корпуса, а также ускорить адаптацию изделия под новое судно. В жизненном цикле это дает выигрыш в логистике запасных частей и создает предпосылки для контрактов сервисного сопровождения по состоянию [5, 7].

Таблица 2 - Влияние модульности на жизненный цикл судовой электрической машины

Этап жизненного цикла	Потенциальный эффект модульности	Ключевое условие реализации
Проектирование	Формирование платформы из типовых секций и ускорение конфигурирования	Наличие библиотеки верифицированных модулей
Производство	Снижение трудоемкости сборки и гибкость по мощности	Высокая точность стыков и повторяемость технологических операций
Монтаж на судне	Упрощение транспортировки крупной машины и поэтапная интеграция	Согласование габаритов модулей с судовой логистикой
Эксплуатация и ремонт	Локальная замена секций и снижение времени простоя	Развитая диагностика и стандартизованные интерфейсы
Модернизация	Возможность наращивания мощности или обновления силовой части	Совместимость новых модулей с базовой платформой

Перспективные направления исследований

Перспективы применения модульных электрических машин в морском судостроении определяются не только улучшением электромагнитной части, но и развитием сопутствующих технологий. Наиболее важными представляются следующие направления [7-12].

- переход к многофазным топологиям с контролируемой деградацией после отказа одной или нескольких секций [8, 11];
- интеграция распределенных датчиков температуры, вибрации и частичных разрядов в каждый модуль [11, 12];

- использование цифрового двойника машины для динамического дерейтингования и прогнозирования остаточного ресурса [11, 12];
- применение аддитивных и гибридных технологий при изготовлении элементов охлаждения, корпусов и сложных магнитопроводов;
- создание унифицированных методик сертификации модульных судовых машин, учитывающих отказоустойчивость и живучесть.

Заключение

Модульная электрическая машина представляет собой одно из наиболее перспективных направлений развития судового электродвижения [7-12]. Ее преимущества наиболее полно раскрываются в тех классах судов, где критичны живучесть, гибкость компоновки, снижение шумности, ремонтпригодность и возможность масштабирования мощности. Вместе с тем эффект модульности не возникает автоматически: он достигается только при совместном проектировании электромагнитной системы, охлаждения, силовой электроники, алгоритмов управления и сервисной архитектуры.

Следовательно, в ближайшей перспективе модульные машины следует рассматривать как платформенную технологию для морского судостроения, а не как частный вариант отдельного двигателя. Именно платформенный подход способен обеспечить переход от единичных опытных образцов к серийным семействам судовых электрических машин, адаптированных под разные типы движительных комплексов и условия эксплуатации [5, 7].

Библиографический список

1. Geertsma R.D., Negenborn R.R., Visser K., Hopman J.J. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships // Applied Energy. - 2017 (дата обращения 26.04.2026).
2. Nuchturee C., Li T., Xia H. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships - A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2020 (дата обращения 26.04.2026).
3. Nguyen H.P., Hoang A.T., Nguyen D.N. et al. The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO₂ emission in ocean shipping: A comprehensive review // International Transactions on Electrical Energy Systems. - 2020 (дата обращения 26.04.2026).
4. Kirtley J.L. Jr., Banerjee A., Englebreton S. Motors for Ship Propulsion // Proceedings of the IEEE. - 2015 (дата обращения 26.04.2026).
5. Hansen J.F., Wendt F. History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends // Proceedings of the IEEE. - 2015 (дата обращения 26.04.2026).
6. Yan X., Liang X., Liu J. et al. A review of progress and applications of ship shaftless rim-driven thrusters // Ocean Engineering. - 2017 (дата обращения 26.04.2026).

7. Gan B., Zhang B., Feng G. Design and Analysis of Modular Permanent Magnet Fault-Tolerant Motor for Ship Direct-Drive Propulsion // IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering. - 2021 (дата обращения 26.04.2026).
8. Choi D.-H., Kim Y.-K., Lee J.-H. Design of a Six-Phase Surface Permanent-Magnet Synchronous Motor with Chamfer-Shaped Magnet to Reduce Cogging Torque and Torque Ripple for Large-Ship Propulsion // Applied Sciences. - 2025 (дата обращения 26.04.2026).
9. Ouldhamrane H., Dubas F., Espanet C. et al. Optimal Design of Axial Flux Permanent Magnet Motors for Ship RIM-Driven Thruster // Machines. - 2022.
10. Karakatsanis T.S. Optimization and Performance Evaluation of PM Motor and Induction Motor for Marine Propulsion Systems // Applied System Innovation. - 2025 (дата обращения 26.04.2026).
11. Wang X., Chen Z., Li Y. et al. Model-free predictive robust control of marine propulsion Six-Phase PMSM based on composite virtual vectors // Ocean Engineering. - 2026 (дата обращения 26.04.2026).
12. Zhang Y., Zhou S., Li J. Coupled magnetic-thermal fields analysis of permanent magnet synchronous motor for ship propulsion based on a 3D analytical model // Applied Thermal Engineering. - 2025 (дата обращения 26.04.2026).

© Хамзин Ф.С., Султангареев Д.У., Шарафутдинова А.Ф., 2026

УДК 621.315.6

И.А. ХАТИПОВ, Н.Р. МУХАМАТУЛЛИН

ilyaskhat@mail.ru, tamada210@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент М.В. ОХОТНИКОВ

Уфимский университет науки и технологий

ТЕРМОСТОЙКИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация: статья посвящена анализу современных термостойких изоляционных материалов, применяемых в конструкции авиационных электрических машин. Рассмотрена связь между требованиями к мощности, массогабаритным характеристикам и предельной рабочей температурой электрической изоляции. Проведен обзор органических полиимидных и неорганических керамических систем изоляции, определены их температурные границы. Особое внимание уделено полностью неорганическим системам, способным работать при температуре до 500 °С.

Ключевые слова: электрическая изоляция, авиационные электрические машины, термостойкость, полиимиды, керамические покрытия, система электрической изоляции.

Введение

В авиастроении прослеживается четкая тенденция к увеличению доли электрических систем в составе силовых установок и бортового оборудования, что отражено в концепциях «более электрического» и «полностью электрического» самолета. Рост плотности мощности электрических машин напрямую зависит от уровня рабочих температур, которые способна выдерживать их внутренняя изоляция [1]. Как отмечают исследователи, именно система электрической изоляции обмоток является самым слабым звеном с точки зрения термической стойкости, определяя предельные возможности всего устройства [2].

Цель данной работы - систематизировать сведения о термостойких изоляционных материалах, используемых или перспективных для применения в авиационных электрических машинах.

Основная часть

Современные классификации электроизоляционных материалов по нагревостойкости опираются на стандарты серии IEC 60085 и ГОСТ 8865-93, устанавливающие семь температурных классов от Y (90 °C) до C (свыше 180 °C) [3]. Для наземных машин общего применения основными являются классы F (155 °C) и H (180 °C), однако авиационные машины предъявляют гораздо более жесткие требования. По данным Д.М. Беленького и соавторов, рабочие температуры в зоне обмоток двигателей, установленных вблизи газотурбинных агрегатов, могут достигать 400-500 °C, что делает неприменимой подавляющую часть традиционных полимерных компаундов [4, 5].

Исторически в качестве термостойкой изоляции для авиационных проводов, катушек и пазовых конструкций применяется полиимидная пленка. Ее преимущества - исключительная диэлектрическая прочность, радиационная стойкость и способность сохранять механическую целостность вплоть до температуры стеклования порядка 360 °C. Однако длительная эксплуатация таких пленок ограничена температурой 240-280 °C, поскольку выше этого порога ускоряются процессы термоокислительной деструкции полимерной матрицы [6]. Дополнительное повышение рабочих характеристик достигается созданием композитных лент, сочетающих слюдяную бумагу, полиимидную пленку и стеклотканевую основу. Например, ленты типа Микатерм 452, относимые к классу нагревостойкости «С» (до 220 °C в продолжительном режиме), демонстрируют высокую устойчивость к частичным разрядам при сохранении гибкости [7].

Принципиально иной подход к решению проблемы термического предела предложен в работах, посвященных полностью неорганическим системам изоляции. Исследователи из IEEE неоднократно подчеркивали, что органические полимеры принципиально не позволяют преодолеть барьер в 300-350 °C для сколько-нибудь длительной эксплуатации [1, 2]. Выходом становится отказ от любых органических связующих и переход на керамические и стеклокерамические покрытия. В качестве примера можно

привести использование тонких пленок нитрида алюминия (AlN), наносимых непосредственно на медную жилу методом физического осаждения из паровой фазы.

Лабораторные тесты подтверждают: барьер из AlN толщиной всего от 90 нм стабильно держит пробивную напряженность на уровне 1 кВ/мкм. При этом теплопроводность материала не проседает ниже 160 Вт/(м·К) даже при экстремальном нагреве до 300 °С, что оставляет далеко позади стандартные полиимидные пленки [8]. Цифровое моделирование тепловых режимов электрических машин с такой изоляцией фиксирует падение рабочей температуры узлов на 6 °С. Если же скомбинировать AlN с высокотеплопроводным заполнителем пазов, можно получить пятикратное ускорение теплоотвода и поднять плотность мощности оборудования почти на 50%.

Альтернативный вектор исследований - использование проводников с тонким керамическим напылением, которые дополнительно защищаются тугоплавким неорганическим цементом. Такое технологическое решение проектировалось под катушки, работающие при критических 500 °С. Относительно слабую электрическую прочность межвиткового слоя в данном случае удалось полностью компенсировать за счет ювелирной геометрии - строго детерминированной, контролируемой укладки каждого витка [9].

Параллельно прорабатывается вариант с изоляционными системами на базе стеклослюдяных бумаг, которые пропитываются кремнийорганическими лаками. Их температурный потолок находится в районе 220–250 °С. Однако здесь есть критический минус: в составе композита все еще присутствует полимерная составляющая. Это значит, что материал неизбежно подвержен постепенной термической деградации и структурному старению в процессе эксплуатации [10]. В таблице 1 обобщены ключевые характеристики рассмотренных материалов.

Таблица 1 - Сравнительные характеристики термостойких изоляционных материалов для авиационных электрических машин

Материал / система	Класс нагревостойкости	Максимальная рабочая температура, °С	Теплопроводность	Примечание
Полиимидная пленка (Kapton)	C (свыше 180)	240-280	низкая	Деградация выше 280 °С
Композитная лента (слюда-полиимид-стеклоткань)	C	220	средняя	Устойчивость к частичным разрядам

Стеклослюдная бумага с кремнийорганическим лаком	С	220-250	средняя	Сохраняет органический компонент
Керамическое покрытие AlN (PVD на Cu)	не классифицирован	500	160 Вт/(м×К) при 300 °С	Полностью неорганическая
Провод с керамическим покрытием и цементом	не классифицирован	500	средняя	Специальная укладка витков

Выводы

Проведенный обзор показывает, что эволюция изоляционных материалов для авиационных электрических машин проходит три условных этапа: от полиимидных пленок с пределом 280 °С через комбинированные органо-неорганические системы на 220-250 °С к полностью неорганическим керамическим покрытиям, работоспособным при 500 °С. Наиболее перспективным направлением является переход на полностью неорганические системы электрической изоляции на основе нитрида алюминия и других тугоплавких диэлектриков, наносимых методами физического осаждения. Дальнейшие исследования должны быть направлены на снижение стоимости таких покрытий и разработку промышленной технологии их нанесения на обмоточные провода сложной геометрии.

Библиографический список

1. Topologies of High Temperature Machines // 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). - Setubal, Portugal: IEEE, 2020. - P. 1-6.
2. Reliability of Insulation Systems and Its Impact on Electric Machine Design for Automotive and Aviation Applications // Energies. - 2024. - Vol. 17, Iss. 24. - Art. no. 6309.
3. ГОСТ 8865-93. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация. - Введ. 1995-01-01. - Минск: Изд-во стандартов, 1994. - 12 с.
4. Беленький Д.М., Каган М.Б., Фридман Я.Б. Электрические машины летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1989. - 384 с.
5. An Electrical Machine Made with Inorganic Rigid Coils: A Breakthrough Toward High Temperature Motors Designed for Aeronautics // 2018 IEEE Transportation

- Electrification Conference and Expo (ITEC). - San Antonio, TX, USA: IEEE, 2018. - P. 1-6.
6. Lizcano M., Williams T.S., Shin E.-S.E., Santiago D., Nguyen B. Aerospace Environmental Challenges for Electrical Insulation and Recent Developments for Electrified Aircraft // Materials. - 2022. - Vol. 15, No. 22. - Art. no. 8121.
 7. Лента Микатерм 452: техническое описание // Dielectrik.ru. - URL: <https://dielectrik.ru> (дата обращения: 20.03.2026).
 8. Kudrynskyi Z.R., Connor P., Cooper T.P. et al. All-Inorganic Electrical Insulation Systems for High-Power Density Electrical Machines // Proceedings of the 2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD). - Toulouse, France: IEEE, 2024. - P. 1-4.
 9. An Insulation Solution for Coils of High Temperature Motors (500°C) // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). - Montpellier, France: IEEE, 2016. - P. 1-6.
 10. Borghei M., Ghassemi M. Insulation Materials and Systems for More- and All-Electric Aircraft: A Review Identifying Challenges and Future Research Needs // IEEE Transactions on Transportation Electrification. - 2021. - Vol. 7, No. 3. - P. 1930-1953.

© Хатилов И.А., Мухаматуллин Н.Р., 2026

УДК 621.313.333

И.А. ХАТИПОВ, Н.Р. МУХАМАТУЛЛИН

ilyaskhat@mail.ru, tamada210@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент М.В. ОХОТНИКОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация: в статье рассматриваются перспективы применения сверхпроводниковых электрических машин в авиационной и транспортной отраслях. Выявлены преимущества технологии: высокая удельная мощность, КПД и плотность момента. Особое внимание уделено высокотемпературным сверхпроводникам (ВТСП) как основе для создания компактных электрических двигателей. Рассмотрены текущие проекты (Airbus/Toshiba, Hinetics, SHEETA/CRUISE) и российские разработки МАИ. Выявлены основные вызовы на пути коммерциализации: сложность криогенных систем и высокая стоимость материалов.

Ключевые слова: электрические машины, высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), электродвижение, авиация, криогенное охлаждение.

Введение

Мировая тенденция к снижению выбросу углерода и повышению эффективности использования энергии способствует развитию электрической тяги в транспорте. В авиационной отрасли это проявляется благодаря концепции «более электрического» и «полностью электрического» воздушного судна. Вместе с тем классические электрические машины с медными обмотками уже близки к предельным значениям по удельной мощности. Это сдерживает их дальнейшее применение в авиации, где масса и габариты оборудования имеют критическое значение. Прорывным решением этой проблемы является использование сверхпроводников, способных пропускать ток без сопротивления и с минимальными потерями при криогенных температурах. Цель данной работы - проанализировать ключевые преимущества, текущее состояние и перспективы внедрения сверхпроводниковых электрических машин (СПЭМ) в различных отраслях промышленности.

Основная часть

Ключевым преимуществом сверхпроводниковых машин является многократное увеличение удельной мощности при одновременном снижении массы. Как показывают исследования, для создания полностью электрического самолета необходимы машины с удельной мощностью свыше 20 кВт/кг [1, 4], в то время как традиционные устройства обеспечивают лишь 3-5 кВт/кг. Применение ВТСП-лент второго поколения в обмотках ротора и статора позволяет достичь значений 8-12 кВт/кг и выше [4]. Например, проект CRUISE (США) достиг расчетной мощности в 40 кВт/кг для 10-мегаваттного двигателя с КПД 99,4%, что стало возможным благодаря интеграции ВТСП-обмоток ротора, беспазового статора и встроенного криокулера [3].

Сверхпроводящие машины также обеспечивают на порядок более высокий крутящий момент и минимальное время отклика на изменение нагрузки. По данным разработчиков стартапа Hinetics, их полностью интегрированный двигатель без внешней криогенной системы демонстрирует в 10 раз более высокую плотность крутящего момента по сравнению с аналогами, что критически важно для систем энергоснабжения и авиации [5]. Это объясняется тем, что высокотемпературные сверхпроводники позволяют создавать магнитные поля с индукцией, в 2-3 раза превышающей показатели традиционных электрических машин, при этом не вызывая насыщения магнитопровода.

Применение сверхпроводниковых технологий предполагает охлаждение обмоток до криогенных температур, что на протяжении длительного времени рассматривалось как одно из главных технических ограничений. Однако в современных проектах предлагаются решения, в которых система охлаждения

включается непосредственно в конструкцию летательного аппарата. Например, в совместной разработке Airbus и Toshiba предполагается использование жидкого водорода с температурой хранения около -253°C . Он одновременно служит топливом для топливных элементов и хладагентом для сверхпроводникового двигателя мощностью 2 МВт. Такой подход позволяет исключить необходимость размещения отдельной массивной криогенной установки на борту и способствует повышению общего КПД силовой установки [6].

Существенные результаты в области создания ВТСП-электрических машин получены также российскими исследовательскими коллективами. Специалисты Московского авиационного института разработали технологию изготовления высокотемпературных сверхпроводниковых катушек с применением отечественных материалов и компонентов, включая компаунды, рассчитанные на эксплуатацию при криогенных температурах [2]. Методика предполагает возможность 3D-печати каркасов и обеспечивает высокую повторяемость результатов, что позволяет перейти от лабораторных образцов к промышленному производству. В МАИ также спроектирована гибридная силовая установка для перспективного вертолета с электрической машиной, обладающей выходной мощностью до 1500 кВт и удельной мощностью 10 кВт/кг [2, 5].

Основными вызовами остаются высокая стоимость ВТСП-лент и сложность создания надежных малогабаритных криокулеров. Тем не менее цена сверхпроводящих материалов за последние годы снизилась вдвое и продолжает падать по мере масштабирования их выпуска [5]. Дальнейшее развитие методов расчета и компьютерного моделирования магнитных полей, совершенствование систем криогенного охлаждения и внедрение полностью неорганической изоляции позволят преодолеть текущие ограничения.

Выводы

Сверхпроводниковые электрические машины обладают значительным потенциалом для революционного изменения электродвижения, в первую очередь в авиации. Их коммерциализация позволит создавать пассажирские самолеты с нулевым уровнем выбросов CO_2 , значительно снижая при этом эксплуатационные расходы. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку полностью автономных криогенных систем, не требующих использования жидких хладагентов, и развитие отечественных технологий промышленного производства ВТСП-лент.

Библиографический список

1. Габрелян А.С., Иванов Н.С., Кондрашов Д.А. и др. Сверхпроводниковая электрическая машина с кольцевой обмоткой якоря // Вестник Московского авиационного института. - 2017. - Т. 24, № 2. - С. 132-140.

2. Самолеты на электротяге: в России создали технологию производства катушек из сверхпроводников / Новостной портал «ТехИнсайдер». - URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/1602019> (дата обращения 02.05.2026).
3. Balachandran T., Salk N.J., Xiao J. et al. Advancements in Superconducting Electric Propulsion: Comparative Analysis and Progress Update of CHEETA and CRUISE Motors // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. - 2025. - Vol. 35, No. 5. - Art. no. 5203105.
4. AEX Aviation Explorer. Сверхпроводниковые электрические двигатели. - URL: <https://www.aex.ru> (дата обращения 02.05.2026).
5. Сверхпроводящий двигатель нового поколения обещает революцию в энергетике и аэрокосмической отрасли / Аналитический портал Supercond. - URL: <https://supercond.ru/2026/01/16/> (дата обращения 02.05.2026).
6. Airbus и Toshiba создают первый водородный самолёт с электротягой / Информационный портал Atomic-energy.ru. - URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2025/10/13/160069> (дата обращения 02.05.2026).

© Хатилов И.А., Мухаматуллин Н.Р., 2026

УДК 621.311.72

Д.И. ЩЕПИН, Р.И. ФАРХУТДИНОВ

i.am.nezyko@gmail.com, 4587540@gmail.com

Науч. руковод. – ассистент кафедры ЭМ, Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ

Уфимский университет науки и технологий

АЛГОРИТМЫ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация: выявлена проблема низкой точности прогнозирования остаточного ресурса интегрированных стартер-генераторов в условиях нестационарных нагрузок и дефицита размеченных данных. В статье представлен комплексный подход, который связывает классические физические модели деградации (учитывающие усталость материалов и износ компонентов) с гибкими алгоритмами машинного обучения и технологиями цифровых двойников (Digital Twins). На основе предложенного инструментария проведен детальный сравнительный анализ эффективности различных конфигураций.

Ключевые слова: интегрированный стартер-генератор; предиктивная диагностика; машинное обучение; цифровой двойник; остаточный ресурс; гибридные алгоритмы; авиационные двигатели.

Глобальный переход к концепции «более электрического самолета» предопределяет масштабную волну модернизации, в ходе которой классические гидравлические устройства и пневматические контуры повсеместно заменяются гибкими электромеханическими приводами. Подобный технологический сдвиг коренным образом ломает привычную архитектуру силовых установок и заставляет инженеров полностью перекраивать схемы распределения бортовых энергетических потоков. Главным связующим звеном в этой новой парадигме становятся интегрированные стартер-генераторы, которые успешно совмещают в себе две ключевые задачи: сначала они обеспечивают раскрутку и запуск турбомашины, а затем плавно переходят в режим генерации для снабжения потребителей. Проектные параметры таких агрегатов позволяют им выдавать колоссальную мощность до 900 кВт как на стабильном крейсерском эшелоне, так и в сложных переходных полетных условиях. При этом в процессе реальной эксплуатации узлы стартер-генераторов сталкиваются с беспрецедентно жесткой средой. Аппаратуре приходится функционировать в условиях резких температурных качелей от космических $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до предельных $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдерживать постоянные вибрационные нагрузки с амплитудой до 20 g в широком спектре частот, а также справляться с агрессивными высокочастотными импульсами от силовых преобразователей, где скорость нарастания напряжения нередко перешагивает отметку в 10 кВ/мкс.

Основное ограничение традиционной системы технического обслуживания связано с тем, что планово-предупредительные регламенты не отражают реальное состояние и степень износа отдельных компонентов. Замена агрегатов по фиксированному налёту может приводить к преждевременному снятию работоспособного оборудования, росту логистических расходов и дополнительной нагрузке на цепочки поставок. В то же время обслуживание только после возникновения неисправности создаёт недопустимые риски внезапного отказа в полёте, что напрямую влияет на безопасность воздушного судна. В связи с этим более рациональным направлением является переход к предиктивной диагностике, позволяющей в режиме реального времени оценивать деградацию узлов, прогнозировать остаточный ресурс и формировать рекомендации по обслуживанию с учётом фактического технического состояния, а не только календарных или наработочных интервалов.

Существующие методы диагностики можно условно разделить на три основные группы, каждая из которых имеет собственные преимущества и ограничения при использовании в авиационных системах. Сигнальные методы, основанные на спектральном анализе токов статора и вибраций корпуса, отличаются относительной простотой, прозрачностью интерпретации и невысокими вычислительными требованиями. Тем не менее, результативность этих подходов резко падает, если на борту одновременно развиваются сразу несколько различных дефектов, сам агрегат функционирует в условиях нестационарных, постоянно меняющихся скоростных режимов, а на полезный

сигнал накладываются плотные акустические помехи и шумы со стороны работающей турбины и компрессора [2]. На этом фоне модельно-ориентированные методики, расширенные фильтры Калмана и алгоритмы параметрической идентификации, выглядят более выигрышно за счет своей строгой физической обоснованности и прозрачности для последующей верификации. Однако и у них есть уязвимые места: такие математические модели критичны к точности задания стартовых условий, нередко теряют устойчивость из-за постепенного дрейфа параметров в процессе долгой эксплуатации, а также крайне тяжело масштабируются, когда дело доходит до описания многофазных нелинейных электромеханических комплексов [6]. В качестве альтернативы выступают методы, полностью построенные на обработке массивов данных, включая рекуррентные и сверточные нейросетевые архитектуры, а также автокодировщики. Подобный инструментарий глубокого обучения отлично справляется с выявлением скрытых нелинейных закономерностей структурной деградации «железа» и без проблем адаптируется к динамически меняющимся полетным режимам. Однако их практическое применение ограничивается дефицитом размеченных данных о редких критических отказах, риском переобучения на стендовых испытаниях и сложностью формального обоснования результатов в соответствии с авиационными стандартами [3]. Поэтому ни один из перечисленных подходов, используемый отдельно, не обеспечивает в полной мере требуемого уровня надёжности, объяснимости и детерминированности, необходимого для сертификации по стандартам DO-178C и DO-331.

Наиболее перспективным направлением является гибридная диагностическая архитектура, объединяющая физические модели деградации, методы машинного обучения и технологию цифровых двойников. Такой подход позволяет частично компенсировать нехватку экспериментальных данных за счёт использования априорных знаний из области термодинамики, электромеханики и механики разрушения. Одновременно система может адаптироваться к особенностям конкретного экземпляра двигателя благодаря онлайн-корректировке весовых коэффициентов и уточнению параметров модели в процессе эксплуатации.

Физико-информированные нейронные сети, или PINN, позволяют включать остатки дифференциальных уравнений теплопередачи и электромагнитного поля непосредственно в функцию потерь. За счёт этого модель сохраняет связь с фундаментальными законами сохранения даже при ограниченном объёме обучающих данных. Кроме того, такой подход повышает устойчивость алгоритма к выбросам измерений и снижает вероятность получения физически некорректных прогнозов. [5]. Реализация концепции цифровых двойников опирается на многоуровневую распределённую архитектуру, где критически важные функции четко разделены между бортом и землей. Периферийный узел (edge) берет на себя мгновенное выявление аномалий и локальный расчет ключевых параметров непосредственно в полете, укладываясь в жесткий лимит задержки не более 10 мс. В это же время

наземный вычислительный центр (cloud) аккумулирует массивы телеметрии со всего воздушного парка, занимается постоянной актуализацией глобальных предиктивных моделей, осуществляет сквозную кросс-валидацию и выдает стратегические предписания по оптимизации графиков технического обслуживания. Чтобы обойти ограничения на передачу конфиденциальной информации, разработчики внедряют технологии федеративного обучения (Federated Learning). Такой подход позволяет непрерывно корректировать и улучшать веса нейросетевых моделей локально, без отправки «сырых» телеметрических файлов на удаленные серверы. Это полностью закрывает жесткие требования к информационной безопасности, предъявляемые современными авиаперевозчиками, и надежно защищает коммерческую тайну производителей двигателестроительного сектора [4].

Экспериментальная проверка на цифровом стенде, имитирующем циклические нагрузки крейсерского полёта, переходные режимы набора высоты и экстремальные температурные воздействия, подтвердила преимущества интегрированного подхода. Гибридные алгоритмы снижают ошибку прогнозирования остаточного ресурса на 18-32 % по сравнению с чистыми моделями машинного обучения и на 25-40 % относительно классических пороговых методов, при этом количество ложных срабатываний сокращается в три-четыре раза, а время раннего обнаружения зарождающихся дефектов подшипникового узла и изоляции обмоток уменьшается на 15-20 % от общего ресурса агрегата [1].

Тем не менее переход от концепции к практической реализации связан с рядом инфраструктурных, вычислительных и нормативных ограничений, которые требуют системного инженерного подхода. Высокая вычислительная нагрузка нейросетевых модулей, особенно операций матричного умножения, делает необходимым применение бортовых вычислительных платформ с аппаратным ускорением. К таким решениям относятся FPGA со встроенными DSP-блоками, а также специализированные нейропроцессоры, способные выполнять инференс в пределах 100-300 мкс без нарушения детерминированности управляющего контура и гарантированного времени реакции системы [7].

Особое значение имеет обеспечение функциональной безопасности и соответствие сертификационным требованиям. Диагностические алгоритмы должны демонстрировать предсказуемое поведение, поддерживать режим безопасной деградации при превышении допустимого уровня неопределённости модели и соответствовать положениям стандартов DO-178C, DO-254 и DO-326A.

В свою очередь, интеллектуальная диагностика не должна подменять собой базовую систему управления и контуры регулирования. Более безопасным и технически обоснованным вариантом является её реализация в виде изолированного мониторингового модуля. Такой модуль может передавать рекомендации в наземный центр технического обслуживания по одностороннему каналу связи, при этом его влияние на исполнительные

механизмы должно быть ограничено заранее установленными аппаратными пределами. При обнаружении аномалий в данных, расхождении прогнозируемых и фактических параметров или выходе метрик качества за допустимые границы система обязана мгновенно переключиться на резервный классический контур с фиксированными коэффициентами, обеспечивая graceful degradation без резких скачков момента или напряжения, при этом все переходы, состояния, диагностические метки и временные синхросигналы логируются с привязкой к бортовому времени для последующего технического аудита и расследования инцидентов [10].

Интеграция в промышленные и авиационные линии возможна исключительно при модульном архитектурном подходе, когда базовая система управления сохраняет сертифицированную конфигурацию, а адаптивный диагностический блок подключается через стандартизированные интерфейсы ARINC 429, AFDX (ARINC 664 Part 7) и CANopen Aerospace с обязательным соблюдением требований временной синхронизации по протоколу RTP/IEEE 1588 с точностью до микросекунд [9]. На этапе пусконаладки и ввода в эксплуатацию инженеры регулярно сталкиваются с дефицитом репрезентативных телеметрических данных по реальным отказам, поэтому наиболее эффективным оказывается двухэтапный подход: предварительная настройка и верификация в симуляционной среде с использованием цифровых двойников и ускоренных стендовых испытаний с последующей тонкой докалибровкой непосредственно на объекте в течение первых 50-100 часов реальной наработки. Такой подход даёт возможность уменьшить влияние систематических расхождений между расчётной моделью и реальным поведением агрегата. В частности, он позволяет учитывать микровибрации вала, отклонения воздушного зазора, температурный дрейф датчиков тока и напряжения, а также нелинейность характеристик силовых полупроводниковых модулей [8].

Кроме технических факторов, при внедрении предиктивной диагностики необходимо учитывать кадровые и экономические условия. Переход от традиционных регламентов технического обслуживания к алгоритмам прогнозирования требует специальной подготовки инженерного персонала. Специалисты должны владеть не только принципами построения нейросетевых моделей и контроля их сходимости, но и методами оценки устойчивости гибридных моделей при экстремальных возмущениях, киберугрозах и постепенной деградации сенсорной системы.

С экономической позиции начальные вложения в вычислительную инфраструктуру, лицензирование программных сред моделирования, валидацию алгоритмов и проведение сертификационных испытаний могут быть компенсированы за счёт последующего снижения эксплуатационных затрат. Основной эффект достигается благодаря сокращению внеплановых простоев воздушных судов, оптимизации поставок запасных частей, уменьшению числа аварийных остановок и увеличению межремонтного интервала на 15-20 %.

Наиболее заметным такой результат будет для операторов с крупным парком воздушных судов и высокой стоимостью технического обслуживания. [6].

В долгосрочной перспективе мы ожидаем появления отраслевых стандартов, регламентирующих тестирование, верификацию и сертификацию ИИ-компонентов диагностических и мониторинговых систем, поскольку отсутствие единых методик формальной проверки границ устойчивости, интерпретируемости правил и устойчивости к adversarial-атакам остаётся главным институциональным барьером для массового внедрения в safety-critical приложения [10]. Разработка открытых репозиторий с анонимизированной телеметрией, внедрение механизмов объяснимого искусственного интеллекта (XAI) для визуализации причинно-следственных связей в принятии решений, применение трансферного обучения для адаптации моделей под конкретные борта и использование генеративно-сопоставительных сетей для синтеза редких сценариев отказов станут следующими логическими шагами в развитии направления. Также стоит отметить, что отсутствие унифицированных протоколов обмена диагностическими метаданными между производителями двигателей, авиастроительными компаниями и операторами замедляет создание кросс-платформенных эталонных наборов данных, необходимых для обучения устойчивых трансферных моделей. Переход к интеллектуальной диагностике следует рассматривать не как прямую замену классических методов или магическое решение всех проблем надёжности, а как эволюционный инженерный этап, направленный на повышение автономности, энергоэффективности, отказоустойчивости и прозрачности процессов технического обслуживания современных авиационных силовых установок [1, 9]. Гибридные архитектуры демонстрируют оптимальный баланс между физической обоснованностью, адаптивностью и инженерной прозрачностью, что подтверждается как расчётными моделями, так и экспериментальными данными. Дальнейшее развитие связано не с усложнением математического аппарата, а с созданием унифицированных программно-аппаратных модулей, встроенных механизмов безопасного резервирования, стандартизированными протоколами обмена данными и инструментами автоматизированной валидации, готовыми к интеграции в сертифицируемые бортовые архитектуры нового поколения.

Библиографический список

1. Zhang Y., Li H., Chen Z. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Integrated Starter-Generators in More Electric Aircraft: A Review // IEEE Access. - 2021. - Vol. 9. - P. 112450-112468. - URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3103542>.
2. Смирнов А.В., Кузнецов Д.С. Методы предиктивной диагностики высокоскоростных авиационных генераторов на основе анализа токовых сигнатур // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - 2022. - № 4. - С. 45-53. - URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/metody-prediktivnoy-diagnostiki-vysokoskorostnyh-aviatsionnyh-generatorov>.

3. Li X., Wang J. LSTM-Based Remaining Useful Life Prediction for Aircraft Starter-Generator Bearings Under Variable Load Conditions // MDPI Aerospace. - 2023. - Vol. 10, № 2. - 145. - URL: <https://doi.org/10.3390/aerospace10020145>.
4. Петров Е.А., Лебедев А.Н. Цифровые двойники электромеханических систем авиационных двигателей: архитектура и алгоритмы диагностики // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2024. - Т. 67, № 3. - С. 210-219. - URL: <https://doi.org/10.17586/1600-9533-2024-67-3-210-219>.
5. Wang H., Liu Y., Zhang Q. Physics-Informed Neural Networks for Thermal Degradation Monitoring of High-Power Density Aircraft Generators // Reliability Engineering & System Safety. - 2022. - Vol. 228. - 108791. - URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108791>.
6. Морозов А.С., Иванов К.Л. Гибридные алгоритмы диагностики подшипниковых узлов интегрированных стартер-генераторов // Научный вестник МГТУ ГА. - 2021. - № 12. - С. 88-96. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gibridnye-algoritmy-diagnostiki-podshipnikovyh-uzlov>.
7. Rossi M., Bianchi N. Real-Time Fault Detection in PMSM-Based Starter-Generators Using Autoencoder-Based Anomaly Detection // MDPI Energies. - 2020. - Vol. 13, № 15. - 3892. - URL: <https://doi.org/10.3390/en13153892>.
8. ГОСТ Р 58855-2020. Системы контроля и диагностики авиационной техники. Основные положения. - М.: Стандартинформ, 2021. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200172845>.
9. Chen L., Zhao R., Li M. Transfer Learning for Rare Fault Diagnosis in Aircraft Electromechanical Actuators and Generators // IEEE Transactions on Industrial Informatics. - 2024. - Vol. 20, № 1. - P. 112-123. - URL: <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3265410>.
10. Козлов Р.И., Сидоров П.В. Верификация алгоритмов машинного обучения в бортовых системах диагностики: требования и методики // Труды МАИ. - 2023. - № 130. - С. 10-18. - URL: <https://trudymai.ru/2023/130/kozlov-sidorov>.

© Щепин Д.И., Фархутдинов Р.И., 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 4. Электротехнические комплексы и системы

<i>Ахмадиев А.Р., Лобович М.С., Ахметгалеев Э.А.</i> Помехоустойчивый ИОТ-мониторинг электромеханических систем в жёстких условиях эксплуатации.....	3
<i>Ахметгалеев Э.А., Лобович М.С., Ахмадиев А.Р.</i> Интеллектуальная система диагностики электродвигателей на базе ИОТ-платформы	9
<i>Горбатков П.В., Султангареев Д.У.</i> Сравнительный анализ архитектур гибридных силовых установок летательных аппаратов.....	12
<i>Горустович А.Л.</i> Обзор методов расчёта установившихся режимов электрических сетей	19
<i>Иванов М.В., Горюхин М.О.</i> Модульные электрические машины для подводных судов и аппаратов: перспективы применения и ограничения	22
<i>Кобзов Д.В., Хамзин Ф.С., Иванов М.В.</i> О возможности применения пресованных катушек в модульной электрической машине.....	28
<i>Лобович М.С., Ахметгалеев Э.А., Ахмадиев А.Р.</i> Оценка ресурса интегрированного стартер-генератора авиационного двигателя при помощи цифрового двойника.....	32
<i>Султангареев Д.У.</i> Оценка эффективности применения двухфазного магнитного материала в интегрированном стартер-генераторе авиационного двигателя	35
<i>Татауров А.И.</i> Сценарная оценка гибридного токового регулятора RMSM-привода на основе скользящего режима с обучаемой режимной коррекцией.....	41
<i>Фархутдинов Р.И., Щепин Д.И.</i> Применение цифровых двойников в авиационных энергетических установках	47
<i>Фархутдинов Р.И., Щепин Д.И.</i> Искусственный интеллект в системах управления электроснабжением more electric aircraft	52
<i>Хамзин Ф.С., Султангареев Д.У., Шарафутдинова А.Ф.</i> Перспективы применения модульных электрических машин в морском судостроении	57
<i>Хатинов И.А., Мухаматуллин Н.Р.</i> Термостойкие изоляционные материалы для авиационных электрических машин.....	63
<i>Хатинов И.А., Мухаматуллин Н.Р.</i> Перспективы применения сверхпроводниковых электрических машин.....	67
<i>Щепин Д.И., Фархутдинов Р.И.</i> Алгоритмы предиктивной диагностики интегрированных стартер-генераторов авиационных двигателей.....	70

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

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 4

Материалы

***XX Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 12–15 мая 2026 г.)***

Электронное издание сетевого доступа

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

Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано к использованию 06.07.2026 г.
Гарнитура «Times New Roman». Объем 1,26 Мб.
Заказ 182.

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

Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: red@uust.ru