



МИНОБРНАУКИ  
РОССИИ



УФИМСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

**приоритет2030<sup>+</sup>**  
лидерами становятся

# МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

## Том 4

---

**Материалы**

**XIX Всероссийской молодёжной научной конференции  
(г. Уфа, 24 – 28 ноября 2025 г.)**



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

# **МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

## **Том 4**

*Материалы  
XIX Всероссийской молодёжной научной конференции  
(г. Уфа, 24 – 28 ноября 2025 г.)*

Научное электронное издание сетевого доступа

Уфа  
Уфимский университет  
2025

УДК 621.3.01  
ББК 31.21  
М12

*Публикуется по решению ученого совета  
Института технологий и материалов УУНУТ.  
Протокол № 4 от 24.12.2025 г.*

***Редакционная коллегия:***

д-р техн. наук, профессор **Ф.Р. Исмагилов** (*отв. редактор*);  
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики,  
директор ПИШ «Моторы будущего» **М.В. Охотников**;  
аспирант, ассистент кафедры ЭМ, инженер ПИШ «Моторы будущего»  
**Д.У. Султангареев**

**Мавлютовские чтения:** материалы XIX Всероссийской молодёжной научной М12 конференции (г. Уфа, 24–28 ноября 2025 г.) / отв. ред. Ф.Р. Исмагилов / в 8 т. Т. 4 [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2025. – 108 с. – URL: <https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2025/405.pdf> – Загл. с титула экрана.

ISBN 978-5-7477-6320-3

Том 4: ISBN 978-5-7477-6328-9

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

Все материалы представлены в авторской редакции.

Мероприятие проведено в рамках субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2025-429 от 23 мая 2025 г.).

УДК 621.3.01  
ББК 31.21

ISBN 978-5-7477-6328-9 (том 4)      © Уфимский университет, 2025  
ISBN 978-5-7477-6320-3

**М.С. АГАДУЛЛИНА**

AgadullinaMS@uust.ru

Науч. руковод. – к.т.н., доцент Д.В. Максудов

***Уфимский университет науки и технологий***

## **Анализ состояния изоляции электрооборудования на основании измерения частичных разрядов**

*Аннотация:* в статье представлен теоретический анализ диагностики изоляции электрооборудования методом измерения частичных разрядов. Рассмотрены физические основы ЧР, современные методы измерения и регистрации. Проанализированы подходы к интерпретации диагностических данных. Показана эффективность метода для прогнозирования остаточного ресурса оборудования.

*Ключевые слова:* частичные разряды; диагностика изоляции; электрооборудование; деградация изоляции; мониторинг; остаточный ресурс.

### **Введение**

Обеспечение надежности электрооборудования высокого напряжения остается одной из наиболее актуальных задач современной электроэнергетики. Статистические данные свидетельствуют, что от 60 до 80% отказов силовых трансформаторов и генераторов связаны с ухудшением состояния изоляционных систем. Частичные разряды (ЧР) представляют собой важнейший диагностический параметр, позволяющий выявлять развивающиеся дефекты изоляции на самых ранних стадиях. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных методов диагностики, обеспечивающих переход от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования.

### **Физическая природа и механизмы возникновения частичных разрядов**

Частичные разряды (ЧР) представляют собой сложный физический процесс, возникающий в результате локальной ионизации диэлектрика в зонах с повышенной напряженностью электрического поля [1]. Физическая сущность этого явления заключается в образовании проводящих каналов в изоляционном материале, которые частично шунтируют изоляцию между электродами. Процесс возникновения ЧР начинается с появления свободных электронов в зоне дефекта, которые под действием электрического поля приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа или диэлектрика [2].

Критическими условиями для возникновения и развития частичных разрядов являются несколько факторов. Во-первых, наличие локальных неоднородностей в диэлектрике, таких как газовые включения, границы раздела фаз, трещины или инородные частицы [3]. Эти неоднородности создают зоны с повышенной напряженностью электрического поля. Во-вторых, величина приложенного напряжения должна превышать критическое значение для данной локальной области [4]. В-третьих, необходима достаточная концентрация свободных носителей заряда для инициирования лавинного процесса. В-четвертых, энергия источника должна быть достаточной для поддержания развивающегося разряда.

Механизмы инициирования ЧР включают несколько физических процессов. Автоэлектронная эмиссия происходит благодаря туннельному эффекту, когда электроны преодолевают потенциальный барьер под действием сильного электрического поля [5]. Этот механизм характерен для острых дефектов нанометрового размера. Термоэлектронная эмиссия возникает при локальном нагреве микрообластей до температур 1000-1500°К, что приводит к испусканию электронов [6]. Фотоэмиссия может наблюдаться при воздействии ультрафиолетового излучения или рентгеновских лучей. Остаточная ионизация играет важную роль при циклическом нагружении, когда ионы от предыдущих разрядов служат затравкой для новых лавин.

### **Классификация частичных разрядов**

Современная система классификации ЧР основана на нескольких критериях, отражающих различные аспекты этого явления [7]. По критерию локализации различают четыре основных типа. Внутренние разряды возникают в толще диэлектрика, обычно в газовых полостях или на границах раздела различных материалов [1]. Поверхностные разряды развиваются вдоль границы раздела диэлектрик-воздух или диэлектрик-диэлектрик, часто в условиях загрязнения поверхности [2]. Краевые разряды концентрируются в зонах резкого изменения геометрии электродов, где наблюдается значительное увеличение напряженности поля. Коронные разряды образуются в газовой среде вокруг острых или тонких проводов.

По физическому механизму развития выделяют таунсендовские разряды, характеризующиеся независимым развитием электронных лавин [3]; стримерные разряды с образованием быстроразвивающихся проводящих каналов; лидерные разряды, представляющие собой продвижение ионизированного канала на значительные расстояния; кистевые разряды, образующие разветвленную структуру в жидких диэлектриках.

По характеру воздействия на изоляцию ЧР подразделяются на активные, непосредственно разрушающие молекулярную структуру диэлектрика; пассивные, служащие индикатором наличия дефектов; циклические, повторяющиеся с определенной периодичностью; прогрессирующие, интенсивность которых со временем увеличивается.

## Современные методы измерения и регистрации

Все методы контроля состояния изоляции можно разделить на разрушающие и неразрушающие. К разрушающим методам относятся испытания повышенным напряжением различного вида: постоянным током, напряжением промышленной частоты или сверхнизкой частоты (например, для диагностики кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена). Существенным недостатком таких испытаний является то, что приложение повышенного напряжения, особенно если в изоляции уже имеются дефекты, может привести к ее дополнительному повреждению и сокращению остаточного срока службы. В этом контексте ключевым преимуществом метода, основанного на измерении частичных разрядов, является его принадлежность к неразрушающим методам контроля. Он позволяет выявлять дефекты на ранней стадии их развития, не подвергая изоляцию значительным электрическим нагрузкам, что сохраняет ее ресурс и позволяет планировать ремонтные работы по фактическому состоянию.

Электрические методы измерения ЧР основаны на регистрации импульсов тока или напряжения, возникающих при каждом акте разряда [6]. Прямые методы включают схемы с последовательным включением измерительного импеданса (схема по ГОСТ 20074), где измеряемый объект включается последовательно с измерительным сопротивлением [7]. Схемы с параллельным включением используются при работе с заземленными объектами [8]. Дифференциальные схемы измерения применяются для компенсации внешних помех путем использования двух идентичных измерительных каналов.

Косвенные электрические методы включают измерение переходных процессов в обмотках трансформаторов и генераторов, основанное на анализе высокочастотных составляющих тока. Метод регистрации электромагнитных полей в УВЧ-диапазоне (300 МГц - 3 ГГц) позволяет детектировать разряды на расстоянии до нескольких метров. Анализ искажений формы кривой напряжения применяется для оценки интегральных параметров ЧР.

Неэлектрические методы предоставляют дополнительные возможности диагностики. Акустические методы используют пьезоэлектрические преобразователи с чувствительностью в диапазоне 20–300 кГц для регистрации ультразвуковых волн. Волоконно-оптические датчики позволяют осуществлять распределенный мониторинг больших объектов. Микрофонные системы применяются для регистрации акустических сигналов в воздушной среде.

Оптические методы включают фотометрические системы с использованием ФЭУ и фотодиодов для регистрации светового излучения разрядов. Спектрометрический анализ позволяет идентифицировать химический состав плазмы разряда. Тепловизионный контроль используется для обнаружения локальных перегревов в зонах интенсивных ЧР.

Химические методы основаны на хроматографическом анализе газов, растворенных в трансформаторном масле. Метод газовой хроматографии позволяет определять концентрации  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ .

Анализ продуктов деструкции твердой изоляции включает определение фурановых соединений и карбоновых кислот.

### **Интерпретация диагностических данных**

Анализ параметров ЧР требует комплексного подхода. Количественные параметры включают кажущийся заряд, измеряемый в пикокулонах (пКл) и характеризующий энергию отдельного разряда. Частота повторения отражает активность дефекта и измеряется в импульсах в секунду. Энергия разряда рассчитывается как интеграл произведения напряжения и тока за время разряда. Средний ток ЧР определяется как сумма зарядов за единицу времени.

Качественные параметры включают фазовое распределение (ф-q-п диаграммы), показывающее зависимость параметров разрядов от фазы питающего напряжения. Форма импульсов тока анализируется по длительности фронта, спада и амплитуде. Временные характеристики включают интервалы между последовательными разрядами и их статистическое распределение [9].

Теоретические модели деградации изоляции включают электронную модель, описывающую воздействие ускоренных электронов с энергией 5–15 эВ на полимерные цепи. Термическая модель учитывает локальный перегрев до температур 1000–1500°K, приводящий к термическому разложению диэлектрика. Химическая модель описывает процессы окисления под действием озона и окислов азота, образующихся в разряде. Механическая модель учитывает ударные волны и механические напряжения от теплового расширения.

### **Выводы**

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность метода частичных разрядов для диагностики состояния изоляции электрооборудования. Установлено, что современные методы измерения ЧР позволяют выявлять развивающиеся дефекты на ранних стадиях. Анализ количественных и качественных параметров разрядов обеспечивает точную идентификацию типа и степени опасности дефектов.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование алгоритмов идентификации дефектов и повышение точности прогнозирования остаточного ресурса.

Внедрение рассмотренных методов позволит перейти к обслуживанию оборудования по фактическому состоянию, что повысит надежность и экономическую эффективность эксплуатации энергетического оборудования.

## Библиографический список

1. Кравченко, В. И. Диагностика высоковольтного оборудования / В. И. Кравченко, П. А. Семенов. - М.: Энергоатомиздат, 2019. - 320 с.
2. IEEE Std 1792-2017: IEEE Guide for Partial Discharge Monitoring of Liquid-Immersed Power Transformers. - 2017. - 45 p.
3. Бартош, В. С. Электрические разряды в газонаполненных полостях изоляции / В. С. Бартош. - М.: Энергия, 2018. - 256 с.
4. Hussain, G. A. Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers / G. A. Hussain, M. S. H. Naderi. - Springer, 2021. - 210 p.
5. Смирнов, П. К. Современные методы диагностики силовых трансформаторов / П. К. Смирнов. - СПб.: Энергопресс, 2020. - 288 с.
6. IEC 60270: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. - 2015. - 78 p.
7. Wang, Z. Advanced Partial Discharge Detection Technology / Z. Wang, L. Li. - Elsevier, 2022. - 340 p.
8. Гусев, А. Л. Цифровые двойники в электроэнергетике / А. Л. Гусев, М. П. Федоров. - М.: Энергоатомиздат, 2023. - 192 с.
9. Martinez, J. A. Artificial Intelligence Applications in Power Systems / J. A. Martinez. - Wiley, 2021. - 415 p.

© Агадуллина М.С., 2025



**А.Р. БАЙБУРИН**

gemini91551@gmail.com

Науч. руковод. – ассистент кафедры ЭМ М.В. ИВАНОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

### **Магнитные материалы, используемые в синхронных машинах с постоянными магнитами**

*Аннотация:* синхронные машины с постоянными магнитами (PMSM) широко применяются в электромобилях благодаря высокому крутящему моменту и эффективности. Основные материалы - магниты на основе NdFeB (неодим-железо-бор) и SmCo (самарий-кобальт), а также кремнистые стали. Выбор магнитного материала напрямую влияет на мощность, КПД и область применения PMSM. В работе рассмотрены свойства различных магнитных материалов и их влияние на характеристики электрической машины.

*Ключевые слова:* синхронная машина, постоянный магнит, диамагнетик, парамагнетик, ферромагнетик, антиферромагнетик, феррит, магнитная индукция, магнитная проницаемость, NdFeB, SmCo, AlNiCo.

Синхронные машины с постоянными магнитами занимают особое место в современных электроприводах, особенно в системах тяговых двигателей для электромобилей и гибридных установок [1][2]. Их популярность объясняется высокой энергоэффективностью, компактностью и стабильностью работы. Однако ключевым элементом, определяющим характеристики таких машин, являются именно магнитные материалы, из которых создаются постоянные магниты и сердечники. От правильного выбора материала зависят величина создаваемого магнитного поля, крутящий момент, потери в стали и общий КПД установки [3][4].

Магнетики - это вещества, которые при внесении во внешнее магнитное поле изменяют его, сами становясь источниками магнитного поля. Все вещества в той или иной степени являются магнетиками, то есть способны намагничиваться под действием внешнего поля. По характеру взаимодействия с магнитным полем все вещества делят на слабомагнитные и сильномагнитные. К слабомагнитным материалам относятся диамагнетики и парамагнетики, а к сильномагнитным - ферромагнетики, антиферромагнетики и ферриты.

Диамагнетики - это вещества, которые намагничиваются в направлении, противоположном внешнему магнитному полю. В их атомах магнитные моменты электронов взаимно компенсированы, поэтому в отсутствии поля магнитные свойства отсутствуют. (рис.1) Примеры диамагнетиков - Ge, Si, C, Bi, Cu, Au или такие соединения как C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub> и т.д. Поскольку индуцированное

поле в них крайне слабое и направлено против внешнего, диамагнетики не применяются в электрических машинах. [5]

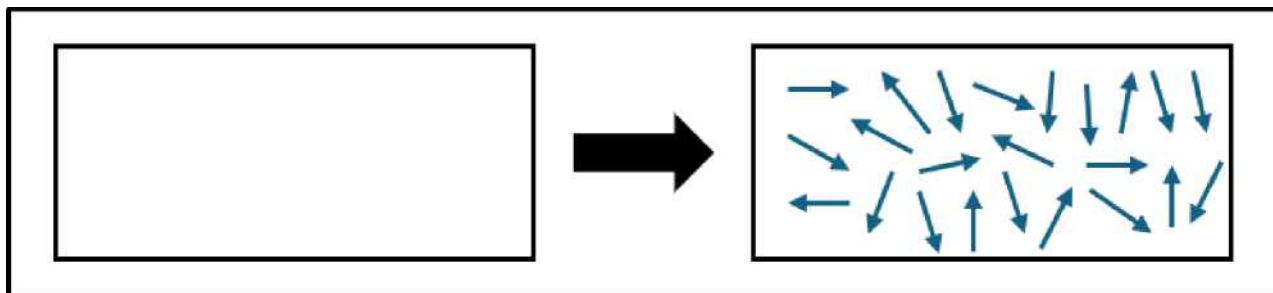


Рис. 1. Диамагнетик до и после намагничивания

Парамагнетики, напротив, намагничиваются по направлению внешнего поля, так как их атомы обладают собственными магнитными моментами. Однако без воздействия поля эти моменты ориентированы хаотично и взаимно компенсируются (рис.2). Под действием магнитного поля создается слабое результирующее намагничивание, поэтому парамагнетики, такие как Al, Ti, W, Li, Mg, Na, Pt также не находят применения в машинах постоянного тока и PMSM, поскольку их магнитная проницаемость практически равна единице. [6]

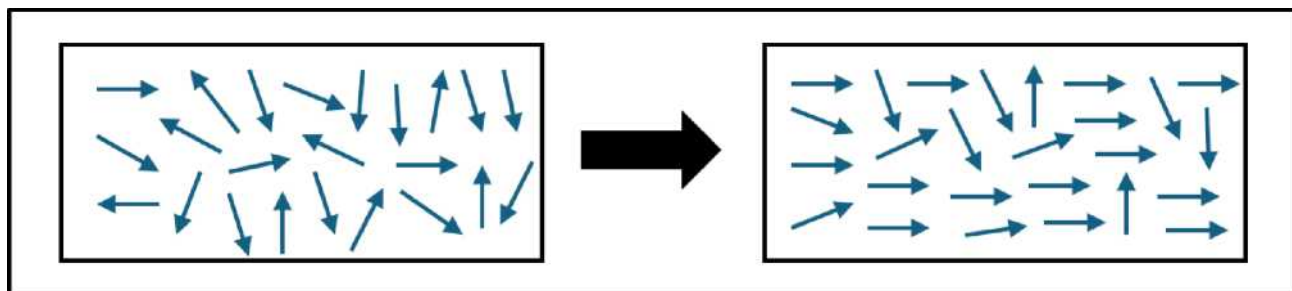


Рис. 2. Парамагнетик до и после намагничивания

Совершенно иными свойствами обладают сильномагнитные материалы - ферромагнетики [7]. Они способны сохранять намагниченность даже после удаления внешнего магнитного поля, что объясняется упорядочением спинов электронов в доменах вещества (рис.3). Среди ферромагнетиков различают магнито-мягкие и магнито-твёрдые материалы. Магнито-мягкие ферромагнетики, такие как электротехнические стали, легко намагничиваются и так же легко размагничиваются, что делает их идеальными для изготовления сердечников статоров и роторов электрических машин. Магнито-твёрдые ферромагнетики, напротив, сохраняют значительную намагниченность после удаления поля и применяются для создания постоянных магнитов. К ним относятся сплавы на основе NdFeB (неодим-железо-бор), SmCo (самарий-кобальт) и AlNiCo (алюминий-никель-кобальт). Также у каждого ферромагнетика имеется такая температура (точка Кюри), выше которой это вещество теряет ферромагнитные свойства и превращается в парамагнетик (рис.4). При охлаждении ферромагнетика ниже  $t_K$  Кюри он вновь приобретает свои первоначальные свойства. У разных видов ферромагнетиков

разная т. Кюри.

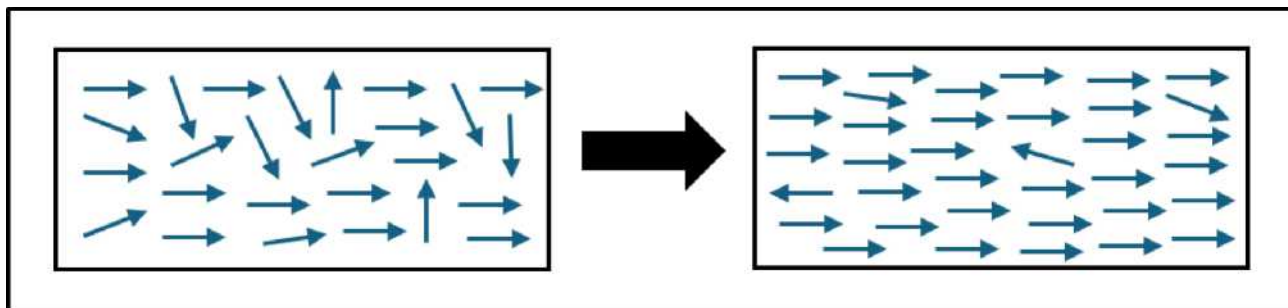


Рис. 3. Ферромагнетик до и после намагничивания

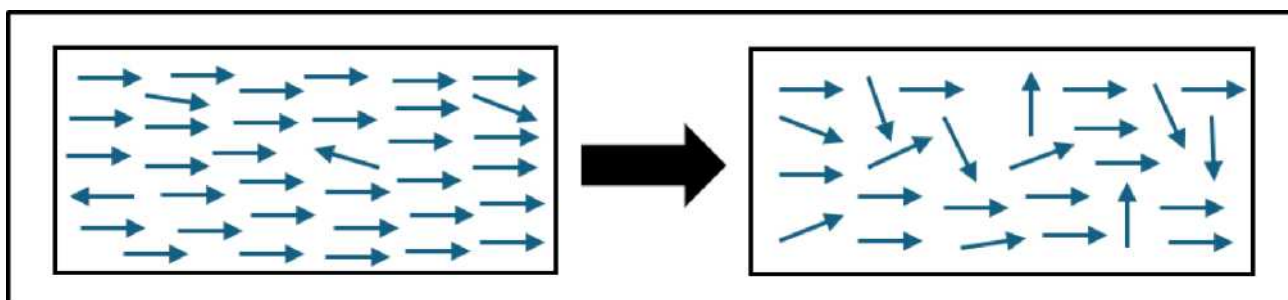


Рис. 4. Ферромагнетик до и после достижения т. Кюри

Антиферромагнетики - это вещества, в которых магнитные моменты соседних атомов направлены противоположно друг другу, в результате чего их суммарное магнитное поле почти полностью компенсируется. Такой эффект делает их внешне немагнитными. Однако при повышении температуры (вблизи точки Нееля,  $T_N$ ) антиферромагнетики могут переходить в парамагнитное состояние. Несмотря на интересные физические свойства, антиферромагнитные материалы не используются в конструкции синхронных машин с постоянными магнитами, так как не способны создавать значительное магнитное поле, необходимое для возбуждения. Примером антиферромагнетиков могут служить  $MnO$ ,  $NiO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $Cr$ ,  $Mn$ ,  $MnF_2$ ,  $CoF_2$ ,  $FeCl_2$  и другие. [8]

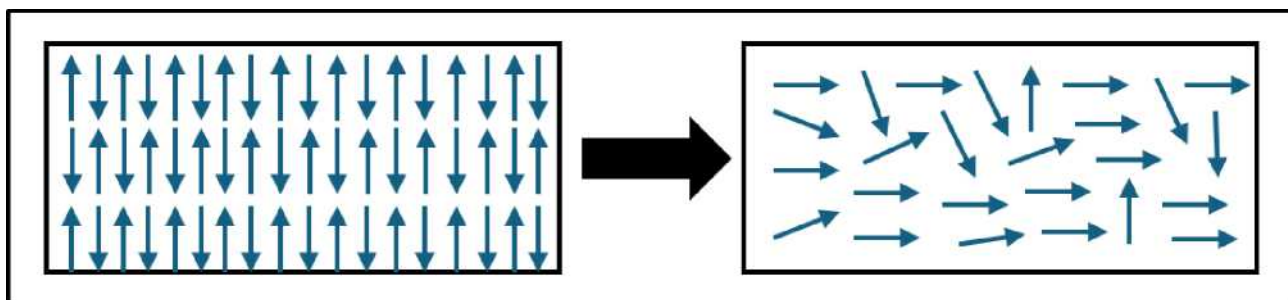


Рис. 5. Антиферромагнетик до и после достижения точки Нееля ( $T_N$ )

Особое место среди сильномагнитных материалов занимают ферриты(рис.6). Ферриты - это химические соединения оксидов железа с другими металлами, например, с марганцем, цинком, никелем или барием. Они обладают ферромагнитными свойствами, но при этом имеют очень высокое

электрическое сопротивление, что значительно снижает потери на вихревые токи. Благодаря этому ферриты широко применяются в трансформаторах, дросселях, антеннах и высокочастотных устройствах. Однако из-за сравнительно низкой остаточной магнитной индукции ферриты редко используются в тяговых или мощных синхронных машинах. Тем не менее в маломощных электродвигателях и генераторах ферритовые магниты могут применяться как более дешёвая альтернатива сплавам NdFeB и SmCo.[9]. Более подробно с характеристиками магнетиков можно ознакомиться в табл. 1[8][0].

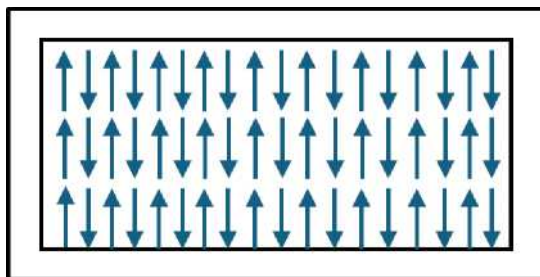


Рис. 6. Феррит

Таблица 1

Сравнительная характеристика всех видов магнетиков

Свойство	Диамагнетики	Парамагнетики	Ферромагнетики	Антиферро-магнетики	Ферриты
<b>Магнитная индукция (В)</b>	Очень мала, противоположно полю	Мала, по направлению поля	Очень велика, сохраняется после снятия поля	Очень мала, взаимно компенсируется	Средняя, ниже чем у ферромагнетиков
<b>Магнитная проницаемость (μ)</b>	<1	~ 1.0001-1.01	»1	Близка к 1	100-1000 (высокая для слабых токов)
<b>Магнитная восприимчивость (χ)</b>	Отрицательная (-КГ <sup>6</sup> ...-КГ <sup>5</sup> )	Положительная (+10 <sup>-5</sup> ...+10 <sup>-3</sup> )	Очень высокая (+10 <sup>3</sup> и более)	Малая положительная, но суммарно = 0	Положительная (до+10=)
<b>Коэрцитивная сила (Hс)</b>	= 0	= 0	От низкой (мягкие стали) до очень высокой (NdFeB. SmCo)	Очень малая	Средняя (ниже, чему NdFeB. но выше, чем у мягких сталей)

<b>Механическая стойкость</b>	Высокая (зависит от металла)	Средняя	Разная: NdFeB хрупкий, стали прочные	Средняя	Хрупкие (керамическая структура)
<b>Коррозионная стойкость</b>	Обычно высокая	Средняя (Al защищен оксидом)	Разная: SmCo устойчив. NdFeB требует покрытия	Средняя	Высокая (устойчивы к окислению)
<b>Цена</b>	От низкой до высокой	Средняя	Разная: NdFeB и SmCo дорогие, стали дешевые	Не используется массово, цена незначима	Низкая - дешёвый заменитель редкоземельных магнитов
<b>Сохранение намагниченности после удаления поля</b>	Нет	Нет	Да	Нет (магн. моменты компенсируются)	Частично сохраняют (ограниченно)
<b>Применение в электрических машинах</b>	Не применяются	Не применяются	Основные материалы (магниты и сердечники)	Не применяются	Используются в маломощных двигателях и трансформаторах

Современные постоянные магниты, используемые в PMSM, изготавливаются преимущественно из сплавов NdFeB и SmCo. Материал NdFeB обладает самым высоким значением остаточной магнитной индукции (до 1,4 Тл) и большой коэрцитивной силой, что позволяет создавать компактные и мощные двигатели. SmCo отличается высокой температурной устойчивостью и коррозионной стойкостью, поэтому его применяют в условиях повышенных температур или агрессивных сред. Материал AlNiCo используется реже, поскольку обладает сравнительно низкой коэрцитивной силой, однако его магнитные свойства отличаются высокой стабильностью и сохраняются со временем. Для изготовления магнитопроводов роторов и статоров широко применяются кремнистые электротехнические стали, обладающие высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на вихревые токи. Их популярность обусловлена тем, что добавление кремния (обычно 2-4,5%) существенно снижает электропроводность материала, тем самым уменьшая потери на вихревые токи и повышая эффективность машин. Кроме того, кремний

улучшает структуру кристаллической решётки стали, увеличивая её магнитную однородность и снижая магнитные потери при перемагничивании. Благодаря этому такие стали обеспечивают высокую экономичность, стабильность характеристик и долговечность работы электрических машин. Более подробно можно ознакомиться в табл. 2.

*Таблица 2*

Сравнительная характеристика популярных и часто используемых магнитных материалов

Свойства	SmCo(са марий-кобальт)	NdFeB(неодим-железо-бор)	AlNiCo (алюминий-никель-кобальт)
Тип материала	Редкоземельный сплав на основе самария и кобальта	Редкоземельный сплав на основе неодима, железа и бора	Классический металлический сплав
Остаточная магнитная индукция (Вт)	0,9-1,1 Тл	1,2-1,4 Тл (наивысшая)	0,6-1,2Тл
Коэрцитивная сила (Нс)	600-2000 кА/м	800-2000 кА/м (очень высокая)	40-160 кА/м (низкая)
Максимальная энергия (ВНшах)	150-240 кДж/м <sup>3</sup>	280-400 кДж/м <sup>3</sup> (самая высокая)	10-80 кДж/м <sup>3</sup>
Рабочая температура	До +350 °С	До +200 °С (с потерей свойств выше)	До +500 °С
Температурная стабильность	Отличная, магнитные свойства сохраняются при нагреве	Средняя - требует защиты от перегрева	Хорошая, стабильные свойства
Коррозионная стойкость	Высокая, не требует покрытия	Низкая, требует никелевого или эпоксидного покрытия	Хорошая
Механическая прочность	Средняя, хрупкий материал	Хрупкий, требует аккуратной сборки	Высокая, хорошо обрабатывается
Стоимость	Очень высокая (редкий самарий, кобальт)	Средне-высокая (неодим дешевле самария)	Низкая
Долговечность	Высокая, устойчив к окислению и деградации	Средняя, склонен к старению при влажности и высокой температуре	Высокая, стабильные свойства во времени

<b>Основное применение</b>	Высокотемпературные двигатели, авиация, космос	Электромобили, генераторы, компактные PMSM	Датчики, электроакустика, приборы
----------------------------	--	--	-----------------------------------

## Заключение

Выбор магнитного материала является ключевым фактором, определяющим эффективность и надёжность синхронных машин с постоянными магнитами. Грамотный подбор материала обеспечивает оптимальное соотношение мощности, КПД, габаритов и термостойкости.

Ферромагнитные материалы обладают наилучшими свойствами для создания устойчивого магнитного поля. Магниты NdFeB применяются в компактных и высокоэффективных электроприводах, SmCo - в установках с повышенной температурой и агрессивной средой, AlNiCo - в приборах, где важна стабильность и термостойкость, а ферриты - в маломощных и экономичных машинах благодаря низкой стоимости и минимальным потерям.

Таким образом, выбор магнитного материала определяется условиями эксплуатации и требованиями к машине. Рациональный подход к выбору обеспечивает повышение эффективности и долговечности синхронных машин нового поколения.

## Библиографический список

1. Laskaris K. I., Kladas A. G. High Torque Internal Permanent Magnet Wheel Motor for Electric Traction Applications // Faculty of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens. (дата обращения: 06.11.2025).
2. Alamoudi Y. A., Atkinson G. J., Mecrow B. C. High Torque Density Permanent Magnet Machine for Automotive Applications. (дата обращения: 06.11.2025).
3. Nicorici A., Ruba M., Marțiș C. S. Comparative Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines Designed for Electric Power Steering Applications // Dep. Electrical Machines and Drives Technical University of Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, Romania (дата обращения: 06.11.2025).
4. Văscan I. Comparative Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines Used in Automotive Compressors // Dep. Electrical Machines and Drives Technical University of Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, Romania. (дата обращения: 06.11.2025).
5. Fuseya Y., Ogata M., Fukuyama H. Transport Properties and Diamagnetism of Dirac Electrons in Bismuth. (дата обращения: 06.11.2025).
6. Corzilius B., Andreas L. B., Smith A. A., Ni Q. Z., Griffin R. G. Induced Signal Quenching in MAS-DNP Experiments in Homogeneous Solutions. (дата обращения: 06.11.2025).
7. Lyuksyutov I. F., Pokrovsky V. L. Ferromagnet - Superconductor Hybrids //

Department of Physics, Texas A&M University. - 2018. - 23 Oct. (дата обращения: 06.11.2025).

8. Song C., You Y., Chen X., Zhou X. How to manipulate magnetic states of antiferromagnets // Department of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China. (дата обращения: 08.11.2025).
9. Thakur P., Chahar D., Taneja S., Bhalla N., Thakur A. A review on MnZn ferrites: Synthesis, characterization and applications. (дата обращения: 08.11.2025).

© Байбурин А.Р., 2025



**А.С. БУРИКОВ, К.А. ГАБДУРАХМАНОВА**

*burikov.leha@mail.ru, kiruhatotelo@gmail.com*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О.В. МЕЛЬНИЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

## **Применение технологий интернета вещей (iot) для мониторинга состояния оборудования трансформаторных подстанций**

*Аннотация:* в статье рассматривается актуальная задача повышения надежности и эффективности эксплуатации трансформаторных подстанций путем внедрения систем мониторинга на базе технологий Интернета вещей (IoT). Анализируется структура такой системы, включая уровни сбора, передачи и анализа данных. Описываются ключевые преимущества применения IoT-решений, такие как переход к предиктивному обслуживанию, снижение эксплуатационных затрат и повышение безопасности персонала.

*Ключевые слова:* Интернет вещей; IoT; трансформаторная подстанция; мониторинг; диагностика; предиктивное обслуживание; надежность; цифровизация энергетики.

Современная электроэнергетическая отрасль находится на этапе глубокой трансформации, обусловленной глобальными трендами цифровизации, декарбонизации и децентрализации. Интеграция возобновляемых источников энергии, развитие электротранспорта и рост цифровой экономики предъявляют качественно новые, повышенные требования к надежности, гибкости и управляемости систем электроснабжения. В этих условиях обеспечение бесперебойной работы ключевых инфраструктурных элементов, таких как трансформаторные подстанции (ТП), приобретает первостепенное значение, поскольку любой сбой в их функционировании может привести к масштабным отключениям потребителей и значительным экономическим потерям.

Традиционная парадигма эксплуатации оборудования ТП, основанная на системе планово-предупредительных ремонтов (ППР), все чаще демонстрирует свою несостоятельность в современных реалиях. Данный подход, базирующийся на периодических визуальных осмотрах, ручных измерениях и анализе проб масла, имеет ряд фундаментальных недостатков. Во-первых, он носит реактивный характер, так как дефекты зачастую обнаруживаются уже на развитой стадии, что увеличивает риск аварий и стоимость ремонта. Во-вторых, значительные временные интервалы между проверками не позволяют отслеживать динамику деградиационных процессов в реальном времени, оставляя "слепые зоны", в которые может произойти отказ. Наконец, такая система требует высоких трудозатрат и сопряжена с рисками для обслуживающего персонала.

Ответом на эти вызовы стало активное внедрение цифровых технологий,

в частности концепции Интернета вещей (Internet of Things, IoT), которая открывает принципиально новые возможности для создания интеллектуальных систем мониторинга электротехнических комплексов. Концепция IoT предполагает оснащение физических объектов (оборудования) сенсорами и объединение их в единую информационную сеть для непрерывного сбора, передачи и анализа данных без непосредственного участия человека. Применительно к трансформаторным подстанциям это позволяет перейти от устаревшей модели ППР к проактивной стратегии обслуживания по фактическому техническому состоянию, организовав непрерывный автоматизированный контроль за работой ключевых узлов.

Структурно систему IoT-мониторинга для трансформаторной подстанции можно разделить на три основных уровня.

Нижний уровень (уровень сбора данных) представляет собой совокупность физических устройств, устанавливаемых непосредственно на контролируемом оборудовании. Ключевыми элементами этого уровня являются автономные беспроводные датчики, которые осуществляют непрерывное измерение критически важных параметров состояния трансформаторной подстанции. К таким параметрам относятся температура масла и обмоток силового трансформатора, уровень и химический состав трансформаторного масла, интенсивность вибрации и акустических шумов, уровень частичных разрядов в изоляции, а также параметры микроклимата (температура и влажность) в помещениях распределительных устройств.

Средний уровень (уровень передачи данных) выполняет функцию промежуточного звена между датчиками и центральной системой анализа. Собранные на нижнем уровне информация по беспроводным протоколам с низким энергопотреблением, таким как LoRaWAN или NB-IoT, передается на IoT-шлюз (или базовую станцию), расположенный на территории подстанции. Шлюз агрегирует данные с множества датчиков и по защищенным каналам связи (например, сотовая связь 4G/5G или оптоволокно) обеспечивает их передачу на верхний уровень для дальнейшей обработки.

Верхний уровень (уровень анализа и визуализации) является «мозговым центром» всей системы мониторинга. Данные, поступающие со шлюза, принимаются серверной платформой, которая может быть реализована как в облачной инфраструктуре, так и на локальных серверах энергокомпании. На этом уровне происходит хранение, обработка и глубокий анализ полученной информации с помощью специализированного программного обеспечения. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет не только фиксировать текущие отклонения, но и выявлять скрытые аномалии, строить предиктивные модели и прогнозировать развитие дефектов. Результаты анализа представляются диспетчерскому и ремонтному персоналу в интуитивно понятном виде через вебинтерфейсы, дашборды и мобильные приложения, а система автоматически генерирует тревожные оповещения при выходе параметров за установленные пределы.

Внедрение такой системы позволяет получить ряд значимых преимуществ:

1. Повышение надежности. Непрерывный мониторинг позволяет выявлять дефекты на ранней стадии, предотвращая развитие аварийных ситуаций;
2. Переход к предиктивному обслуживанию. Вместо планово-предупредительных ремонтов обслуживание оборудования производится по его фактическому состоянию, что оптимизирует использование ресурсов;
3. Снижение эксплуатационных затрат. Сокращается число ручных осмотров, уменьшаются расходы на аварийно-восстановительные работы и потери от простоев оборудования;
4. Повышение безопасности. Снижается необходимость присутствия персонала на действующем электрооборудовании для проведения измерений.

Для наглядной демонстрации эффективности IoT-решений рассмотрим наиболее актуальный и критически важный пример - мониторинг состояния высоковольтного силового трансформатора, заполненного маслом. Отказ такого трансформатора ведет к катастрофическим последствиям: длительному отключению потребителей, огромным финансовым потерям (стоимость нового агрегата и его замена может исчисляться десятками миллионов рублей) и серьезным рискам для безопасности.

Как это происходит сейчас (традиционный подход). Ключевым методом диагностики внутреннего состояния трансформатора является анализ растворенных в масле газов (АРВГ). Возникающие внутри дефекты (например, искрение или перегрев) вызывают разложение масла и изоляции с выделением определенных газов (водород, ацетилен, метан и др.).

Текущая практика выглядит так:

1. Периодичность. Раз в 6-12 месяцев (или после аварийных событий) на подстанцию выезжает бригада специалистов;
2. Процесс. Персонал вручную отбирает пробу масла из бака трансформатора в специальный шприц. Эта процедура требует соблюдения строгих правил безопасности, так как работа ведется на действующем высоковольтном оборудовании;
3. Анализ. Проба доставляется в стационарную химическую лабораторию, где на хроматографе проводится анализ. Процесс занимает от нескольких дней до недели;
4. Результат. Только по итогам анализа инженеры могут сделать вывод о наличии и характере развивающегося дефекта.

Главный недостаток. Между моментом возникновения дефекта и его обнаружением может пройти почти год. За это время незначительная проблема может перерасти в необратимое повреждение, которое приведет к аварийному выходу трансформатора из строя. Система работает реактивно, а не проактивно.

Как это могло бы быть с применением IoT. На тот же трансформатор устанавливается стационарный онлайн-датчик АРВГ. Это компактное устройство, которое монтируется непосредственно на корпус трансформатора и подключается к его масляной системе.

Новая схема работы выглядит следующим образом:

1. Непрерывный мониторинг. Датчик в автоматическом режиме, с периодичностью от нескольких минут до нескольких часов, производит забор и анализ микропорций масла. Он непрерывно измеряет концентрацию ключевых "газов-маркеров" (например, водорода  $H_2$  и ацетилена  $C_2H_2$ );
2. Передача данных. Полученные данные (например, "Концентрация  $H_2$  – 150 ppm, тренд растущий") в режиме реального времени через IoT-шлюз передаются на сервер диспетчерского центра;
3. Анализ и предикция. Программное обеспечение на сервере не просто фиксирует данные, а анализирует их динамику (скорость роста концентрации газов), сопоставляет с нагрузкой трансформатора и температурой. При обнаружении опасной тенденции, которая является предвестником будущего отказа, система автоматически формирует предупреждение для инженеров;
4. Принятие решений. Получив сигнал, диспетчер может заблаговременно спланировать диагностику, вывести трансформатор в ремонт в удобное время, предотвратив его разрушение и внезапное отключение.

Главное преимущество: Система IoT превращает трансформатор из «черного ящика» в полностью наблюдаемый объект. Вместо редких "снимков" состояния раз в год, инженеры получают непрерывную "кардиограмму" его работы, что позволяет обнаруживать дефекты на самой ранней стадии и переходить к настоящему предиктивному обслуживанию.

Таким образом, применение технологий Интернета вещей для мониторинга трансформаторных подстанций представляет собой не просто техническое усовершенствование, а фундаментальный сдвиг в подходе к эксплуатации критически важной инфраструктуры. Переход от реактивной модели планово-предупредительных ремонтов к проактивной стратегии, основанной на непрерывном анализе данных, позволяет достичь комплексного положительного эффекта. Ключевыми результатами внедрения становятся существенное повышение надежности за счет выявления дефектов на ранней стадии, оптимизация затрат благодаря обслуживанию оборудования по его фактическому состоянию, а также повышение безопасности персонала за счет минимизации его присутствия на действующих энергообъектах.

В более широком стратегическом контексте, оснащение подстанций интеллектуальными системами мониторинга является необходимым шагом на пути к цифровой трансформации всей электроэнергетической отрасли. Это позволяет создать технологическую основу для построения интеллектуальных сетей (Smart Grid), повысить общую наблюдаемость и управляемость энергосистемы, а также подготовить инфраструктуру к вызовам будущего, таким как интеграция возобновляемых источников энергии и развитие электротранспорта. В конечном счете, данный подход позволяет не только решить текущие эксплуатационные задачи, но и заложить фундамент для создания более гибкой, эффективной и устойчивой энергетической системы.

### **Библиографический список**

1. Кулаков, А. Т. Цифровая трансформация в электроэнергетике: проблемы и перспективы: монография / А. Т. Кулаков, С. В. Ерошенко. - Москва: Энергоатомиздат, 2021. - 240 с. (дата обращения: 05.11.2025).
2. Воротницкий, В. Э. Интернет вещей в задачах мониторинга электросетевых объектов / В. Э. Воротницкий // Энергетик. - 2020. - № 5. - С. 1217. (дата обращения: 05.11.2025).
3. Gungor, V. C. A Survey on Wireless Sensor Networks for Smart Grid Applications / V. C. Gungor, B. Lu, G. P. Hancke // IEEE Communications Surveys & Tutorials. - 2010. - Vol. 12, Issue 4. - P. 450-464. (дата обращения: 05.11.2025).

© Буриков А.С., Габдурахманова К.А., 2025

**Д.В. ВОРФОЛОМЕЕВ, А.А. САВИНЫХ**

*dimitrivorfolomeeff@yandex.ru, sasasavinyh381@gmail.com*

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

*Уфимский университет науки и технологий*

## **Обоснование применения электрической машины с внешним ротором для БПЛА**

*Аннотация:* в статье освещается суть термина «БПЛА» при помощи воздушного кодекса РФ. Поясняется какие электродвигатели используются в беспилотных летательных аппаратах. Также объясняется почему бесколлекторные электродвигатели используют в БПЛА.  
*Ключевые слова:* БПЛА, внешний ротор, электродвигатель, постоянные магниты.

### **Введение**

Уже невозможно представить современный мир без беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Эти устройства широко используются в нашей повседневной жизни, от военных до гражданских целей. Применение электрических машин с внешним ротором в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) является перспективным направлением развития современной авиационной техники. Такие двигатели обладают рядом уникальных преимуществ, позволяющих существенно повысить эффективность и надежность функционирования аппаратов различного назначения



*Рис. 1. Сферы применения БПЛА. [6]*

### **Беспилотные летательные аппараты**

Необходимо точно определить, что именно подразумевается под понятием "беспилотный летательный аппарат" (БПЛА).

Определение беспилотного летательного аппарата содержится в Воздушном кодексе РФ. При этом стоит учесть то, что в Кодексе прежде всего используется понятие «воздушное судно». Под воздушным судном понимается летательный аппарат, поддерживаемый в атмосфере за счет взаимодействия с воздухом, отличного от взаимодействия с воздухом, отраженным от поверхности земли или воды (п. 1 ст. 32 Воздушного кодекса РФ). Беспилотное воздушное судно (БВС) воздушное судно, управляемое, контролируемое в полете пилотом, находящимся вне борта такого воздушного судна (внешний пилот) (п. 5 ст. 32 Воздушного кодекса РФ). Следует отметить, что, хотя в широком смысле к БПЛА можно отнести достаточно большое количество объектов (в том числе, ракеты, воздушные зонды и др.), в настоящей статье приводятся только дистанционно пилотируемые летательные аппараты. [1]

### Электродвигатели

Стоит понять, как воздушное судно (БПЛА) поддерживается и перемещается в атмосфере. Следует отметить, что, хотя в широком смысле к БПЛА можно отнести достаточно большое количество объектов (в том числе, ракеты, воздушные зонды и др.) [2], в данной статье обсуждаются только дистанционно пилотируемые летательные аппараты. Беспилотных летательных аппаратов оснащены электродвигателями, благодаря которым БПЛА могут поддерживаться в воздухе. Электрические двигатели могут быть коллекторными постоянного тока магнитоэлектрического возбуждения (с помощью постоянного магнита) и бесколлекторными. [2]



Рис. 2. Конструкция коллекторного двигателя на постоянных магнитах и его схема. [5]



*Рис. 3. Продольный разрез бесколлекторного электродвигателя с внутренним ротором. [4]*

Стоит ответить на вопрос почему же используют внешний ротор и синхронный двигатель с постоянными магнитами (бесколлекторный электродвигатель с внешним ротором). Применение бесколлекторного электродвигателя в БПЛА обусловлено несколькими причинами. В бесколлекторном электродвигателе отсутствует коллектор, точнее щеточно-коллекторный узел, что упрощает конструкцию электродвигателя. Из этого следует, что и вес электродвигателя облегчается, а размер уменьшается. У бесколлекторных электродвигателей коэффициент полезного действия выше чем у коллекторных, так как в коллекторном электродвигателе имеется постоянный скользящий контакт, изнашивающийся и подгорающий, что уменьшает токопропускную способность. [3] На практике у бесколлекторных электродвигателей КПД возможно достичь 95%. [3] Бесколлекторные электродвигатели имеют меньшую тепловую нагрузку, чем электродвигатели с коллекторами. Бесколлекторные электродвигатели практически не создают радиопомех и соответственно практически не влияют на функционирование бортового оборудования в отличие от коллекторных электродвигателей, в котором щетки и пластины коллектора непрерывно размыкаются, что вызывает искрение, приводящее к радиопомехам. [3]

### **Заключение**

Беспилотные летательные аппараты могут выполнять самые различные задачи. Для этих задач необходимо также самый оптимальный двигатель. Электродвигатели в это случае намного больше подходят для решения задач. Бесколлекторный электродвигатель с внешним ротором самый оптимальный для БПЛА. Благодаря его высокому КПД, меньшей тепловой нагрузке, так же отсутствием радиопомех.



### Библиографический список

1. Освещается суть термина «БПЛА» [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoeffektivnost-i-razvitie-umnyh-setey-v-regionah-rossii> (дата обращения: 22.09.2025).
2. Современное состояние и перспективы развития силовых установок беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-silovyh-ustanovok-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov/viewer> (дата обращения: 07.01.2025).
3. Двигатели для беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvigateli-dlya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov/viewer> (дата обращения: 07.01.2025).
4. Бесколлекторный двигатель постоянного тока [Электронный ресурс] // InnoDrive. - URL: [https://innodrive.ru/articles/malogabaritnye-elektrodvigateli/beskollektornyj\\_dvigatel\\_postoyannogo\\_toka/](https://innodrive.ru/articles/malogabaritnye-elektrodvigateli/beskollektornyj_dvigatel_postoyannogo_toka/) (дата обращения: 08.11.2025).
5. Коллекторный двигатель [Электронный ресурс] // ASUTPP. - URL: <https://www.asutpp.ru/kollektornyj-dvigatel.html> (дата обращения: 08.11.2025).
6. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-perspektivy-razvitiya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov/viewer> (дата обращения: 08.11.2025).

© Савиных А.А., Ворфоломеев Д.В., 2025

**М.О. ГОРЮХИН**

*gorukhinmo@uust.ru*

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

*Уфимский университет науки и технологий*

## **Современные тенденции развития электротехнических комплексов в авиационной технике**

*Аннотация:* в статье рассмотрены ключевые направления развития электротехнических комплексов в авиационной технике с акцентом на международные стандарты и современные технологии. Проанализированы архитектуры More Electric Aircraft, применение силовой электроники на основе GaN и SiC, повышение удельной мощности машин, вопросы надёжности и сертификации. Отдельное внимание уделено перспективам интеграции интеллектуальных систем и сверхпроводящих компонентов.

*Ключевые слова:* More Electric Aircraft, GaN, SiC, силовая электроника, электропривод, авиация, надёжность, сертификация, электроснабжение, электромеханика.

### **Введение**

В последние десятилетия в авиации явно обозначился тренд перехода к «More Electric Aircraft» – самолётам с возросшим удельным использованием электрических систем взамен традиционных гидравлических и пневматических. Цель этого перехода – повысить топливную эффективность, снизить выбросы и эксплуатационные расходы, а также улучшить надёжность оборудования. Системы, ранее приводимые в действие от отбора воздуха или гидравлики (системы кондиционирования, запуска двигателей, наземное электропитание и т. п.), заменяются на электрические. Так, в среднем магистральном самолёте Boeing 787 полностью отказались от пневматических вспомогательных систем: вместо отбора воздуха от двигателя использованы электрические компрессоры для кондиционирования воздуха (электроприводы силовых авиационных установок), требующие значительно большей электроэнергии на борту [1]. Также в новой архитектуре отменён гидромеханический редуктор генератора: в Boeing 787 и Airbus A380 генератор прямо соединён с валом двигателя, что даёт постоянное напряжение и переменную частоту выходного тока (от 350 до 800 Гц). В целом, замена механических и пневматических систем на электрические «power-by-wire» приводы позволяет повысить надёжность и простоту обслуживания вспомогательной силовой установки за счёт отказа от сложных механизмов (стартер-турбин, насосов, магистралей отбора воздуха) [2]. Например, в современных самолётах конструкторы полностью переходят на

электроприводы органов управления (электромеханические актуаторы), что избавляет от тяжёлых гидросистем и повышает манёвренность и надёжность воздушного судна (рисунок 1).

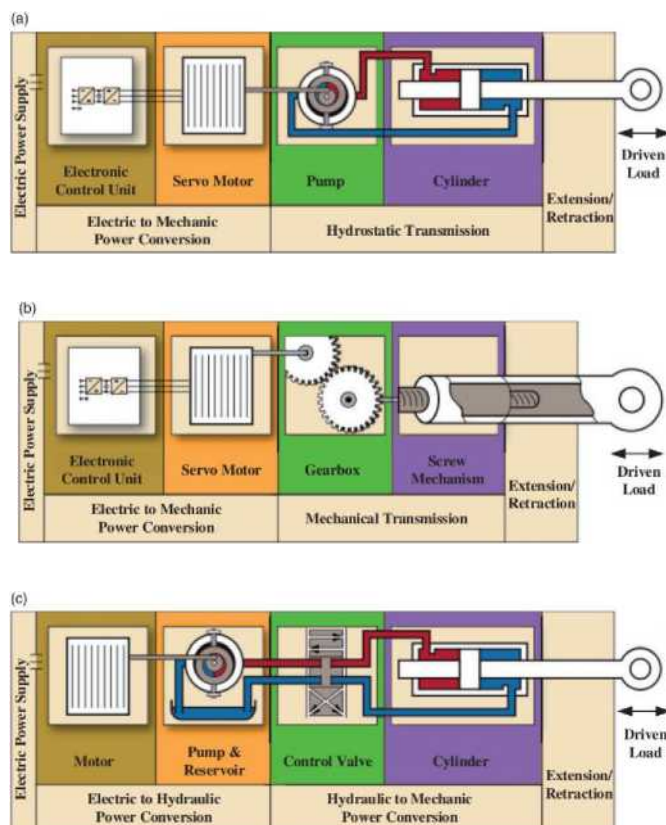


Рис. 1. Электроприводы и состав гидравлических сервоприводов (hydraulic servo actuators HAS): (a) электрогидростатический привод (electrohydrostatic actuator EHA), (b) электромеханический привод (electromechanical actuator EMA) и (c) HAS [2]

Эти изменения требуют разработки новой элементной базы и архитектурных решений в силовой электронике и энергетике самолёта.

### Текущее состояние электротехнических комплексов

Современные воздушные суда используют сертифицированные наработки в электроэнергетике. Стандартная архитектура электросети – это неизменное напряжение постоянного тока с переменной частотой. В США и НАТО приняты MIL-STD-704 и RTCA DO-160, которые задают требования к бортовым источникам питания: генераторы выдают постоянное 270 В (или кратно 270/400 Вольт) с переменной частотой (400 Гц или выше) [1]. При этом постоянно ведутся исследования по повышению напряжения распределения: применение шин в 540 вольт постоянного тока (VDC) позволяет уменьшить токи в магистрали и снизить массу кабелей [3]. Например, компания Safran разрабатывает системы распределения GENeUSGRID, рассчитанные на вход/выход до 540 V постоянного тока [4]. Повышенное напряжение уже используется в военной и современно коммерческой технике: переход на 270–

540 VDC потребовал специальных контакторов и защит (усиленные электроды, магниты искрогасящие) для безопасного коммутационного разрыва цепей высокого напряжения.

Одновременно растёт доля интегрированных стартер-генераторов на валу двигателя. В новых лайнерах (B787, A350) генератор является одновременно генератором и мотором – для запуска двигателей он получает питание от вспомогательного генератора и раскручивает главный двигатель, полностью отказавшись от пневмо-стартеров [1]. Наиболее перспективны бесщёточные постоянные магниты и синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов, обеспечивающие высокую удельную мощность и быстродействие. Это позволяет отказаться от масляной тяги и вентиляционных пневмотрубок, упрощая вспомогательную силовую установку.

На сегодняшний день авиационные актуаторы почти полностью перешли на электроприводы. Конвейерные самолёты Boeing и Airbus оснащаются сотнями электромеханических приводов для рулей и закрылков. Отказ от гидравлики снижает массу бортовых систем, улучшает отказоустойчивость и снижает затраты на техническое обслуживание. Гирокомпасы, стабилизаторы полёта, вспомогательные насосы теперь тоже получают питание от бортовой сети через силовую электронику и микропроцессорные контроллеры – что ставит в число ключевых технологий высокопроизводительную силовую электронику и цифровые системы управления [2].

### **Современные технологические тенденции**

Среди ведущих направлений – применение силовой электроники на основе полупроводников широких запрещённых зон (Wide Band Gap WBG) – GaN и SiC-транзисторов. Эти материалы позволяют повысить рабочие частоты преобразователей, снизить потери и уменьшить габариты систем. Как показано в недавнем обзоре, GaN и SiC-устройства допускают работу при более высоких температуре и частоте переключения, а также обеспечивают значительно большую плотность мощности по сравнению с кремнием. Так, GaN-свичи обладают более низким сопротивлением открытого канала, что даёт малые проводимые потери и меньшую площадь кристалла, однако их теплопроводность ниже, поэтому требуется эффективное охлаждение. При этом широкая запрещённая зона GaN и SiC позволяет устройствам работать при температурах выше 300 °C (до 600 °C в теории), что существенно повышает надёжность при экстремальных условиях. В целом, такие WBG-компоненты уже привели к росту удельной мощности преобразователей и уменьшению их веса и объёма (рисунок 2) [5].

Одновременно развиваются электрические машины и материалы. Для увеличения плотности мощности двигателей используются новые сплавы и технологии изготовления: высокоэнергетические редкоземельные магниты, криогенное охлаждение и аддитивное производство дают возможность создавать

компоновки с оптимизированным теплообменом и формой магнитопровода. Как отмечают специалисты, интеграция WBG-компонентов с лёгкими

конструкционными материалами и 3D-печатью позволяет увеличить удельную мощность машин на порядок при сохранении эффективности [6].

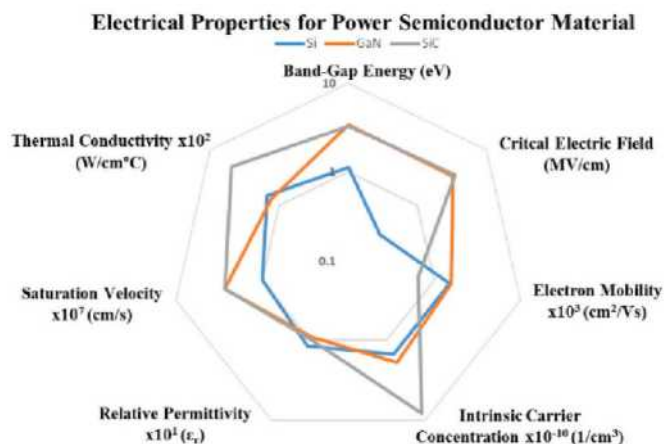


Рис. 2. Сравнение свойств материалов полупроводников из Si и полупроводников с широкой запрещенной зоной, такие как нитрид галлия (GaN) и карбид кремния (SiC) [5]

Также на первый план выходят интеллектуальные системы управления и модульные архитектуры. Повышение децентрализации бортовой сети требует сложных алгоритмов управления питанием и коммуникацией. В современных проектах внедряются цифровые контроллеры каждого силового агрегата с возможностью диагностики отказов «на лету» (Fault-Tolerant Control). Архитектуры распределённого электропитания строятся на принципах модульности: вместо гигантских централизованных блоков применяются «строительные блоки» – массивы унифицированных силовых модулей и конвертеров [7]. К примеру, набор из нескольких параллельных DC/DC-преобразователей по 2–5 кВт обеспечивает гибкость и избыточность: выход одного модуля может быть отключён без потери питания всего оборудования. Повышение напряжения шины до 540–800 В позволяет снизить токи и вес проводки, при этом локальные ступени понижения напряжения питают узлы с низковольтными нагрузками [3].

## Основные вызовы

Новые тенденции сопряжены с осложнением традиционных проблем. Надёжность электроники и двигателей остаётся критичным фактором: высокая плотность мощности порождает жёсткие тепловые нагрузки и ускоряет деградацию полупроводников. Например, быстрые переходные процессы в GaN-ключках приводят к значительным высокочастотным помехам, расширяя спектр излучаемых помех [3]. Для снижения электромагнитных помех требуются экранирование, активные фильтры и минимизация длины силовых связей.

Управление температурой также критично: снижение теплового сопротивления силовых модулей требует передовых систем отвода тепла – от медных радиаторов с интегрированными водяными каналами до двухфазных охладителей и термоэлектрических элементов. По оценкам, при прочих равных изделиях на WBG-технологии необходимо более тщательное термуправление, так как их разница температур кристалл-корпус на 40% выше, чем у полупроводников из Si [5].

Кроме того, экранирование и электромагнитные потери остаются серьёзными препятствиями. При высокочастотном переключении систем (кГц и выше) электроприводы могут создавать помехи, влияющие на работу радиосвязи и навигации. В авиации для сертификации электромагнитной совместимости используются стандарты RTCA DO-160 [1]. Это означает обязательные испытания на излучение и восприимчивость ко всем типам помех. Повышенная склонность силовых преобразователей на SiC и GaN к генерации высокочастотных помех делает особенно важными тщательное проектирование систем и проведение полного комплекса сертификационных испытаний по электромагнитной совместимости. Любое изменение архитектуры электросистемы требует доказательств безопасности. Так, для авионики действует комплекс стандартов разработки: RTCA DO-178C задаёт процедуру разработки ПО (линейные уровни критичности от А до Е, основанные на оценке возможных последствий отказа), а RTCA DO-254 – аналогично для аппаратной части. Эти требования часто удлиняют цикл вывода новых технологий на рынок и увеличивают затраты разработки.

### **Перспективы развития**

Следующее поколение самолётов предполагается ещё более «электрическим». Ведутся эксперименты по гибридно-электрическим силовым установкам и распределённому турбовентиляторному электротяге. Для достижения заданной тяги рассматриваются сверхпроводящие машины: считается, что высокотемпературные сверхпроводники – единственный путь обеспечить экстремально высокую удельную мощность генераторов и моторов при допустимых массогабаритах [8]. В перспективе применение сверхпроводимости позволит создать электрические летательные аппараты с комбинированной тягой и снизить расход топлива ниже современных показателей. Кроме того, ожидается рост роли «умных сетей» – интеграция систем накопления энергии (батарей и топливных элементов) и широкое применение аналитики больших данных для прогнозирования отказов. Международные инициативы (программы NASA X-57, Clean Sky в ЕС, проекты «Умный двигатель» от Rolls-Royce) также фокусируются на снижении веса и увеличении эффективности за счёт полной электрификации вспомогательной силовой установки и электрического привода.

## Заключение

Сегодня в авиации проводится широкая электрификация бортовых систем: от интегрированных стартер-генераторов на двигателях до электроприводов органов управления. Международные стандарты (MIL-STD-704, DO-160, DO-178C/DO-254) регламентируют эти изменения. Актуальные технологии включают схемы распределения 270/540 VDC, силовые GaN/SiC-конвертеры, высокооборотные двигатели с редкоземельными магнитами, а также развитые системы управления и охлаждения. Основные вызовы – обеспечение надёжности и электромагнитной совместимости при очень высоком уровне мощностей, а также прохождение строгих сертификаций. Перспективные направления – развитие сверхпроводящих машин и гибридных архитектур, что может открыть путь к новым поколениям электрических и гибридно-электрических самолётов. С учётом международного опыта и стандартов, эти тенденции задают курс на принципиально новые инженерные решения в авиационной технике.

## 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. – Т. 1. – №. 1. – С. 54-64.
2. Qiao G. et al. A review of electromechanical actuators for More/All Electric aircraft systems //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2018. – Т. 232. – №. 22. – С. 4128-4151.
3. Rosero J. A. et al. Moving towards a more electric aircraft //IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2007. – Т. 22. – №. 3. – С. 3-9.
4. Safran Electrical & Power. Primary Power Distribution System GENeUSGRID™ (описание), *Safran Group*. [Электронный ресурс]. URL <https://www.safran-group.com/products-services/primary-power-distribution-system#:~:text=Power%20Management%20up%20to%201,MW> (дата обращения: 15.11.2025).
5. Wileman A. J., Aslam S., Perinpanayagam S. A road map for reliable power electronics for more electric aircraft //Progress in Aerospace Sciences. – 2021. – Т. 127. – С. 100739.
6. Международная конференция ITEC. *Preliminary Program ITEC 2025* [Электронный ресурс]. – Франкфурт, 2025. – URL: [https://itec-conf.com/app/uploads/2025/06/Program\\_ITEC2025-6.18.2025.pdf](https://itec-conf.com/app/uploads/2025/06/Program_ITEC2025-6.18.2025.pdf) (дата обращения: 15.11.2025).
7. Modular strategies for power conversion [Электронный ресурс] / TT Electronics. – URL: <https://www.ttelectronics.com/news/modular-strategies-for-power-conversion-03-22/#:~:text=The%20end%20unit%20itself%20defines,If%20an%20unlikely%20failure> (дата обращения: 15.11.2025).

8. Luongo C. A. et al. Next generation more-electric aircraft: A potential application for HTS superconductors //IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2009. – Т. 19. – №. 3. – С. 1055-1068.

© Горюхин М.О., 2025



**И.В. ЗМАНОВСКАЯ**

zmivs@yandex.ru

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

*Уфимский университет науки и технологий*

## **Современные материалы и принципы отказоустойчивости электрических машин для транспортных применений**

*Аннотация:* проведен анализ современных тенденций в электромашиностроении для транспортных применений. Рассмотрены перспективные материалы и технологии, обеспечивающие повышенную надежность. Систематизированы принципы отказоустойчивости электрических машин. Показана технологическая преемственность решений автопроизводителей с авиационными стандартами.

*Ключевые слова:* отказоустойчивость; электрическая машина; электромобиль; пазовая изоляция; магнитные материалы; интегрированный привод.

Современный этап развития электромашиностроения характеризуется качественным преобразованием подходов к проектированию и производству, вызванным интенсивной транспортной электрификацией. Актуальной задачей становится создание электрических машин, способных сохранять функциональность при экстремальных нагрузках и частичных отказах, что требует системного подхода, объединяющего достижения в области функциональных материалов, прецизионного производства и интеллектуальных систем управления.

### **1. Современные материалы и технологические решения**

Основой для создания надежных машин являются современные материалы. Значительный интерес представляют высококремнистые стали (6.5% Si), которые демонстрируют снижение магнитных потерь на 40-50% по сравнению с традиционными сталями (3% Si) при сохранении свойств до 200°C. Технология химического парофазного осаждения (CVD) позволила решить проблему обработки этих хрупких сталей, как в продукции компании JFE Steel (марка JNE) для электромобилей и авиатехники.

Перспективным направлением являются мягкие магнитные композиты (SMC), например, материалы Somaloy шведской компании Högans. Они обеспечивают снижение потерь на вихревые токи в 3-4 раза и позволяют создавать изотропные магнитные системы сложной геометрии для двигателей с поперечным полем и осевых потоков.

В области постоянных магнитов разработки направлены на снижение зависимости от диспрозия и тербия. Технология диффузии границ зерен позволяет создавать магниты на основе Nd-Fe-B с повышенной коэрцитивной силой при минимальном содержании тяжелых редкоземельных элементов (серии от TDK Corporation и VACUUMSCHMELZE), сохраняющие рабочие характеристики до 180°C.

Эволюция пазовой изоляции статора привела к ее превращению из простого барьера в многофункциональную систему. К современным материалам предъявляется комплекс требований: диэлектрическая прочность 12-25 кВ/мм, термическая стабильность до 180-220°C, повышенная теплопроводность (0.8-1.5 Вт/(м\*К)), механическая прочность и стойкость к частичным разрядам.

Широко применяются термореактивные композитные системы на основе стеклоткани, арамидной бумаги (Nomex) и комбинированных материалов (DMD). Пропиточные составы (эпоксидные, силиконовые смолы) модифицируются неорганическими нанонаполнителями (AlN, BN), что позволяет повысить теплопроводность и снизить коэффициент теплового расширения. В массовом производстве, особенно в автомобильной промышленности, доминируют термопластичные системы: полиэтиленнафталат (PEN) и полиэфирэфиркетон (PEEK), обеспечивающие высокую скорость переработки и возможность рециклинга.

Ключевым технологическим прорывом в производстве обмоток стала технология Hairpin, использующая предварительно сформированные прямоугольные проводники. Она обеспечивает коэффициент заполнения паза до 70-80% (на 25-30% выше, чем у круглых проводников), снижение потерь в меди на 15-20% и улучшение теплоотвода. Перспективным направлением является аддитивное производство обмоточных узлов методом селективного лазерного плавления (SLM), позволяющее создавать обмотки сложной геометрии с интегрированными каналами охлаждения и снижать массу на 20-25%.

## **2. Принципы обеспечения отказоустойчивости**

Отказоустойчивость современной электрической машины - это ее способность выполнять основные функции, возможно, в ухудшенном режиме, при возникновении частичных отказов или работе в условиях, выходящих за номинальные параметры. Философия проектирования базируется на трех столпах: предотвращение отказа, локализация повреждения и адаптация функциональности.

Тепловая отказоустойчивость предполагает способность выдерживать продолжительное воздействие высоких температур (до 180-220°C) и резкие термические удары. Для этого используются теплостойкие изоляционные материалы классов H и выше, применяются пасты с высокой теплопроводностью, системы прямого жидкостного охлаждения и закладывается

запас по плотности тока. Системы теплового мониторинга с датчиками в горячих точках (например, волоконно-оптические решетки Брэгга) позволяют не просто отключать машину, а адаптивно снижать нагрузку, переходя в щадящий режим.

Для обеспечения стойкости к термическим ударам критически важно согласование коэффициентов теплового расширения материалов (меди, стали, изоляции), применение демпфирующих элементов и использование алгоритмов плавного пуска на основе тепловых моделей машины.

Динамическая отказоустойчивость касается способности выдерживать превышения скорости и вибрации. Конструкция ротора рассчитывается с запасом по скорости до 1.5-2 раз от номинальной, для бандажей используются высокопрочные композиты (стекло-, углеволокно). Для борьбы с вибрациями применяется прецизионная балансировка, демпфирующие материалы и активные системы виброзащиты на основе пьезоактуаторов или магнитных подшипников.

Основой современной отказоустойчивости становятся интегральные системы мониторинга и интеллектуальное управление. Сети датчиков, включая датчики частичных разрядов и датчики Холла, в сочетании с алгоритмами машинного обучения позволяют прогнозировать остаточный ресурс компонентов и переводить систему в безопасный деградированный режим для завершения критической миссии.

### **3. Анализ зарубежных аналогов и преемственность с авиастроением**

Анализ решений ведущих производителей, таких как Mercedes-Benz, Scania и Tesla, выявляет общие тенденции, имеющие точки соприкосновения с авиационными практиками.

В автомобилестроении доминирует концепция интегрированной электрической машины, где в едином корпусе объединены электродвигатель, редуктор и силовая электроника (например, eATS от Mercedes, drive-unit от Tesla). Это прямое заимствование авиационного подхода для снижения массы, количества соединений и упрощения компоновки, аналогичное интеграции во вспомогательных силовых установках (ВСУ) самолетов.

Обеспечение надежности и отказоустойчивости достигается за счет резервирования. В двигателях Mercedes eATS используются две независимые трехфазные обмотки в одном статоре с отдельными инверторами. В системах Tesla реализовано резервирование на уровне контроллеров и датчиков. Это соответствует принципу «безопасного отказа», характерному для критических систем в авиации.

Широкое применение теплостойких материалов (изоляция класса H, композиты на основе РЕЕК, керамика) и сложных систем жидкостного охлаждения в электромобилях является прямым следствием авиационных требований к работе в продолжительных пиковых режимах.

Подход к диагностике, применяемый Tesla - непрерывный сбор телеметрии и предсказательная аналитика для перехода к обслуживанию по

состоянию - аналогичен системам мониторинга состояния вертолетов (HUMS) в авиации.

## **Заключение**

Проведенный анализ демонстрирует, что создание отказоустойчивых электрических машин для транспортных применений требует синергетического сочетания передовых материалов, продуманной конструкции и интеллектуальных систем управления. Ключевыми направлениями развития являются: углубление интеграции компонентов, внедрение многофункциональных материалов с улучшенными тепловыми и механическими характеристиками, а также повсеместное использование цифровых двойников и систем предиктивной аналитики. Отрасль электромобилей стала драйвером внедрения высочайших стандартов надежности, заимствуя и адаптируя проверенные принципы и решения из авиационной промышленности.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-29-00675 «Разработка фундаментальных научных основ высокоэффективного электромеханического преобразователя энергии с повышенными удельными характеристиками и элементов гибридной силовой установки»

## **Библиографический список**

1. Амангалиев, Е. З. Электромобильный и гибридный транспорт: силовые схемы, оборудование, проблемы и перспективы развития / Е. З. Амангалиев, А. С. Сарваров, В. И. Косматов [и др.] // Вестник университета. -2023. -№ 4. -С. 45-60. (дата обращения: 05.11.2025).
2. Сорокин, К. П. Обзор и анализ механических передач мехатронных трансмиссий для грузовых автомобилей и автобусов, оснащенных электрическими накопителями энергии / К. П. Сорокин, Н. В. Бузунов, А. Б. Карташов [и др.] // Транспорт на альтернативном топливе. - 2024. - № 1(75). - С. 32-40. (дата обращения: 05.11.2025).

© Змановская И.В., 2025

**Г.Р. ИБАТУЛИНА**

*gulnur5@list.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, К.А. БАРАБАНОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

### **Обеспечение отказоустойчивости СДПМ с использованием секционирования**

*Аннотация:* в статье рассмотрены методы управления синхронным электродвигателем с модульным статором, направленные на обеспечение отказоустойчивости. В ответ на высокие требования к надежности в предложена архитектура на основе секционированной системы управления. Рассматривается концепция деления активной части машины на независимые и изолированные секции, что позволяет локализовать повреждение и исключить каскадное развитие неисправностей.

*Ключевые слова:* синхронный двигатель с постоянными магнитами, модульный статор, отказоустойчивое управление, секционированная система управления.

#### **Введение**

Критически важные области, включая авиационную и военную промышленность, предъявляют исключительные требования к надежности электромеханических систем. Ключевым аспектом является способность оборудования сохранять работоспособность при частичных повреждениях. Однако традиционные электродвигатели и стандартные системы управления уязвимы: локальный отказ в них часто приводит к распространению неисправности и полному отказу привода.

В связи с этим актуальной задачей становится разработка новых отказоустойчивых решений. Перспективным направлением является применение модульного подхода к проектированию как самой электрической машины, так и системы её управления. В данной работе исследуется синхронный электродвигатель с модульной конструкцией статора, управление которым реализовано на принципах секционирования.

#### **СДПМ с модульным статором**

Секционирование предполагает деление электрической машины на независимые секции, каждая из которых способна функционировать при выходе из строя соседней.

Физическая и электромагнитная изоляция секций предотвращает распространение неисправности между частями машины, ограничивая повреждение только одним модулем и сохраняя работоспособность остальных

элементов. Использование секционирования облегчает ремонт, обеспечивает возможность быстрой замены секций и увеличивает гибкость в управлении приводом.

В статье [1] представлены одно-, двух- и четырёхсекционные варианты конструкции, в которых достигается физическая, магнитная, электрическая и тепловая изоляция между двумя трёхфазными каналами за счёт удаления одного полюсного шага обмотки статора. Проводится подробный электромагнитный анализ их электромагнитных характеристик, которые затем сравниваются с эталонной комбинацией 30s/10p для заданной выходной мощности 50 кВт.

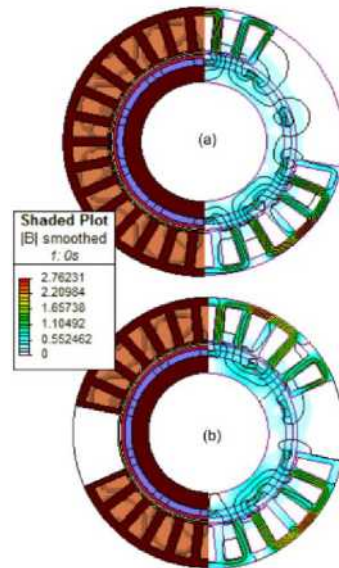


Рис. 1. Радиальное сечение и разделение потока для секционных (a) и двухсекционных машин (b) с ПМ

Радиальное сечение и распределение потока для односекционных и двухсекционных машин с ПМ показаны на рис. 1a и 1b соответственно.

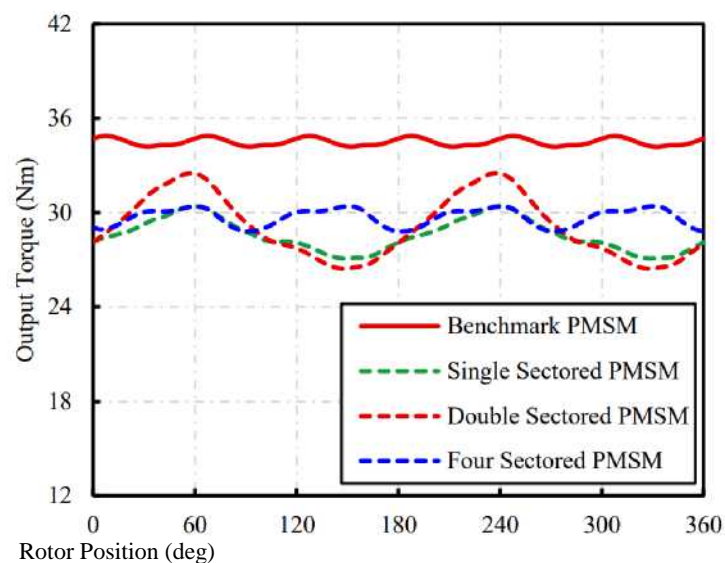


Рис. 2. Сравнение крутящего момента при полной нагрузке эталонной и секционной машин

На рис. 2 представлен крутящий момент каждой машины, и проведено сравнение с эталонной машиной. По графику видно, что выходной крутящий момент снижается примерно до 20% от крутящего момента эталонной машины из-за удаления полюсного шага обмотки статора.

Сравнение среднего крутящего момента и связанных с ним пульсаций крутящего момента для всех трех конструкций машин от лучшего до худшего и невозможного приведено в таблице 1, где «++», «+», «-», «- -», «X» - это лучшие, хорошие, плохие, худшие и невозможные показатели соответственно.

*Таблица 1*

**Сравнение эталонной машины и новых секционных машин**

Конструкция машины	Пульсации крутящего момента	Магнитное разъединение	Физическая изоляция	Тепловое разъединение	Радиальные силы
Эталонная машина	++	X	-	X	++
Односекционная ПМСМ	-	-	-	X	-
Двухсекционная ПМСМ	-	++	++	+	++
Четырехсекционная ПМСМ	+	++	++	+	++

### **Особенности управления секционированным СДПМ**

В секционированном СДПМ существуют конструктивные неидеальности, такие как разброс параметров модулей и неоднородность магнитных зазоров, что приводит к несимметрии токов и момента. Эффективное управление должно учитывать эти факторы для компенсации и выравнивания приводимых сигналов.

Возможно централизованное и распределенное управление СДПМ [2]. Централизованное управление позволяет одному контроллеру формировать управляющие сигналы для всех модулей на основе общей модели машины. Это обеспечивает согласованную работу, но чувствительно к сбоям центрального контроллера и требует дополнительных мер для обеспечения отказоустойчивости при выходе из строя одной из секций.

Децентрализованное управление предусматривает наличие собственного контроллера в каждом модуле с обменом данными между ними. Такой подход повышает отказоустойчивость и гибкость, позволяя работе продолжаться при неисправности одного из модулей.

Различные методы управления имеют свои особенности и ограничения, влияющие на эффективность и надежность работы, поэтому выбор способа управления для СДПМ с модульным статором важен для компенсации его недостатков и особенностей.

6-шаговое управление по датчикам Холла - метод управления бесщеточным двигателем постоянного тока (BLDC), при котором три датчика

Холла, расположенные под  $120^\circ$ , определяют положение ротора [3]. Датчики формируют шесть комбинаций сигналов за электрический цикл, задавая последовательность коммутации обмоток.

Шестишаговое управление секционированным СДПМ обеспечивает простой и надежный механизм обеспечения отказоустойчивости за счет аппаратного резервирования, однако оно наследует все недостатки трапецеидального управления и усложняет силовую часть и систему синхронизации.

Векторное управление (без датчика обратной связи/с датчиком обратной связи) - метод, при котором скорость и положение ротора оцениваются алгоритмически на основе измерений тока и напряжения или с физическим энкодером. Это один из подходов к управлению, который позволяет отдельно контролировать магнитный поток и момент, действующий на вал двигателя. Задача векторного управления - преобразовать измеренные фазные токи статора в систему координат, связанную с магнитным потоком ротора, что обеспечивает раздельное управление моментом и потоком.

Для корректного векторного управления необходимо обеспечить жесткую синхронизацию по фазе и частоте между модулями, чтобы суммарный электромагнитный момент был плавным и не содержал пульсаций. Также синхронизация может быть реализована через общую систему координат, но требует точной информации о положении ротора для каждого модуля.

Векторное управление при модульной структуре статора требует более сложной архитектуры системы управления, учитывающей развязку модулей, синхронизацию, компенсацию неидеальностей и отказоустойчивость. Тем не менее, при грамотной реализации такая структура открывает возможности для повышения надежности и эффективности электроприводов.

Прямое управление моментом позволяет регулировать электромагнитный момент на валу двигателя, обеспечивая быструю реакцию на управляющее воздействие. В отличие от векторного управления, где управляемой величиной является ток статора, здесь регулируется потокосцепление статора [4].

При модульной структуре следует оценивать поток и момент каждого модуля, принимая решения на их уровне с последующей координацией. Модули могут иметь разные частоты переключений, и их несогласованность вызывает пульсации момента, гармоники тока и вибрации. Для такой системы необходим быстрый контроллер с параллельными вычислениями.

Реализация прямого управления моментом при модульной структуре требует переработки классического алгоритма - от локальных оценок параметров до синхронизированного и отказоустойчивого управления.

## **Выводы**

Секционирование синхронного электродвигателя является эффективным решением для повышения отказоустойчивости, так как разделение активной части машины на независимые, электрически и магнитно-изолированные секции



позволяет локализовать повреждения, предотвращая их распространение и сохраняя работоспособность при частичных отказах.

Выбор способа управления для секционного СДПМ напрямую влияет на компенсацию недостатков машины, ее динамические характеристики, надежность и отказоустойчивость. Централизованное управление удобно для согласованной работы в нормальных условиях, тогда как распределенное обеспечивает большую гибкость и устойчивость к сбоям или при наличии конструктивных особенностей модулей. Также это позволяет поддерживать функционирование привода при выходе из строя одного или нескольких модулей и адаптировать алгоритмы управления в реальном времени, минимизируя потери мощности и момента.

### **Библиографический список**

1. Khowja M. R. Fault-tolerant dual channels three-phase PMSM for aerospace applications / M. R. Khowja, K. Singh, A. La Rocca, G. Vakil, R. Ramnathan, C. Gerada // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 126845–126857. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3451705>. (дата обращения: 06.11.2025).
2. Козаченко В. Цифровое векторное управление вентильно-индукторными двигателями с независимым возбуждением / В. Козаченко, А. Анучин, А. Дроздов, А. Жарков // Компоненты и технологии. – 2004. – № 8. (дата обращения: 06.11.2025).
3. Корельский Д. В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами / Д. В. Корельский, Е. М. Потапенко, Е. В. Васильева // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2001. – С. 155–159. (дата обращения: 06.11.2025).
4. Рефки А. Э. В. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами / А. Э. В. Рефки, А. С. Каракулов, Ю. Н. Дементьев, С. Н. Кладиев // Известия ТПУ. – 2011. – № 4. (дата обращения: 06.11.2025).

© Ибатулина Г.Р., 2025

**Р.М. МУСИН**

musin.rasull@mail.ru

Науч. руковод. – ассистент кафедры ЭМ М.В. ИВАНОВ

*Уфимский университет науки и технологии*

### **Термоэлектрические генераторы: принципы работы и перспективы применения**

*Аннотация:* в статье исследуются термоэлектрические явления и их применение в модулях на основе эффектов Зеебека, Пельтье и Томсона. Рассматриваются принципы работы и конструктивные особенности термоэлектрических генераторов, включая использование полупроводников р- и n-типа. Приведены результаты исследования двухступенчатого рекуперативного ТЭГ для электромобилей, показавшие, что при эффективности системы 39% генератор превосходит традиционный ДВС по топливной экономичности на 7.7%, подтверждая перспективность технологии.

*Ключевые слова:* термоэлектричество, эффект Зеебека, эффект Пельтье, эффект Томсона, термоэлектрический генератор, элемент Пельтье, термоэлектрический модуль, термоэлектрический охладитель

Термоэлектричество - физическое явление и область технологий, основанные на прямом взаимном преобразовании тепловой и электрической энергии в цепях из разнородных проводников или полупроводников, проявляющемся в эффектах Зеебека, Пельтье, Томсона.

Эффект Зеебека был открыт в 1821 году. Эффект Зеебека заключается в возникновении электрического тока в замкнутой цепи, состоящей из последовательно соединённых разнородных проводников или полупроводников, где места их контактов имеют разные температуры [1].

Эффект Пельтье был открыт в 1834 году. Эффект Пельтье заключается в выделении или поглощении тепла на контакте (спае) двух разнородных проводников или полупроводников при протекании через него электрического тока [2].

Эффект Томсона был открыт в 1856 году. Эффект Томсона заключается в поглощении или выделении тепла в однородном проводнике или полупроводнике, по которому протекает электрический ток, при наличии градиента температуры вдоль проводника или полупроводника.

На основе эффекта Пельтье был разработан термоэлектрический модуль (элемент Пельтье), который используют как термоэлектрический охладитель (ТЭО) [3], но стоит применить эффект Зеебека, в место эффекта Пельтье к модулю, то получим термоэлектрический генератор (ТЭГ) [4]. В термоэлектрических модулях используют полупроводники вместо обычных проводников, т.к. проявление эффектов Пельтье и Зеебека увеличивается во

много раз [5]. Их конструкция включает пары полупроводниковых элементов,

соединённых электрически последовательно и расположенных термически параллельно между двумя керамическими пластинами (как правило, из оксида алюминия  $Al_2O_3$ , диоксида кремния  $SiO_2$  и оксида бериллия  $BeO$ ).

Полупроводниковые ветви соединяются металлическими контактами - в коммерческих модулях это медные проводящие дорожки, известные как «межсоединения». Для предотвращения диффузии материалов при высокотемпературной эксплуатации на контакты наносится барьерный слой (например, никель  $Ni$  или комбинация серебра  $Ag$  и олова  $Sn$ ). Пары состоят из чередующихся  $n$ - и  $p$ -типов полупроводников, где в  $n$ -ветвях переносчиками тепла являются электроны, а в  $p$ -ветвях - дырки. Легирование полупроводников заключается во введении примесей: трёхвалентные элементы (например, бор) создают  $p$ -тип с акцепторными свойствами, а пятивалентные (например, фосфор) формируют  $n$ -тип, выступая донорами электронов [6].

Конструкцию элемента Пельтье можно классифицировать по конфигурации: плоские, вертикальные и смешанные [6].

- Плоская схема размещения термоэлектрических ножек подразумевает разделение горячих и холодных контактов по разные стороны подложки, что создает температурный градиент ( $\Delta T_{ТЭГ}$ ) в её плоскости. Несмотря на это, данная конструкция не была коммерциализирована ввиду своей неэффективности для большинства рыночных применений. Её типовое исполнение показано на рисунке 3 [6];

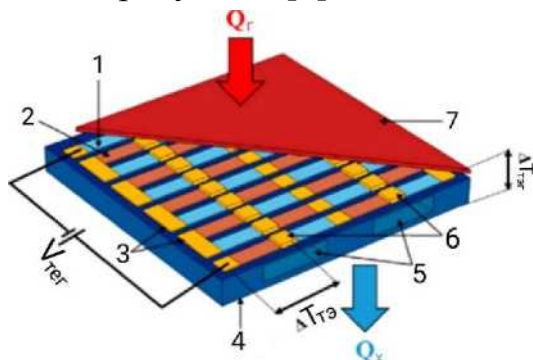


Рис. 1. Плоская конфигурация элемента Пельтье. 1 -  $p$ -тип; 2 -  $n$ -тип; 3 - холодный контакт; 4 - холодная сторона пластины; 5 - полости; 6 - горячий контакт; 7 - горячая сторона пластины.

- Вертикальная компоновка предполагает размещение холодных и горячих контактов на противоположных сторонах подложки. При этом используются более короткие, но многочисленные термоэлектрические элементы, а требуемый перепад температур ( $\Delta T_{ТЭГ}$ ) создаётся перпендикулярно её плоскости. Именно эта конструкция получила наибольшее коммерческое распространение и широко применяется в различных бытовых приборах. Её типовое исполнение показано на рисунке 4 [6];

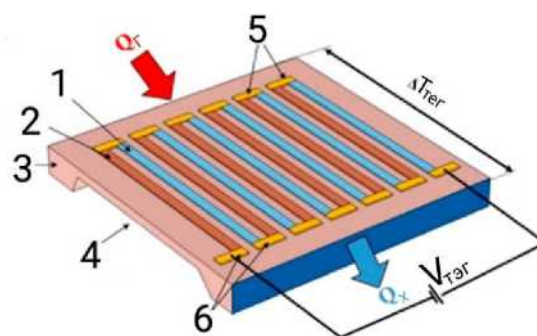


Рис. 2. Вертикальная конфигурация элемента Пельтье. 1 - р-тип; 2 - n-тип; 3 - подложка; 4 - гравированная подложка для снижения теплопередачи; 5 - горячий контакт; 6 - холодный контакт.

- Данная схема получила название «смешанной», поскольку перепад температур для генерации ( $\Delta T_{\text{ТЭГ}}$ ) применен перпендикулярно базовой плоскости модуля (как в вертикальной конструкции), а градиент для охлаждения ( $\Delta T_{\text{ТЭ}}$ ) создаётся в её плоскости (как в планарной). В настоящее время такие модули уже используются в коммерческих системах термоэлектрического охлаждения, однако благодаря своей хорошей адаптивности потенциал для других применений активно исследуется. Типовой модуль смешанного типа показан на рисунке 5 [6].

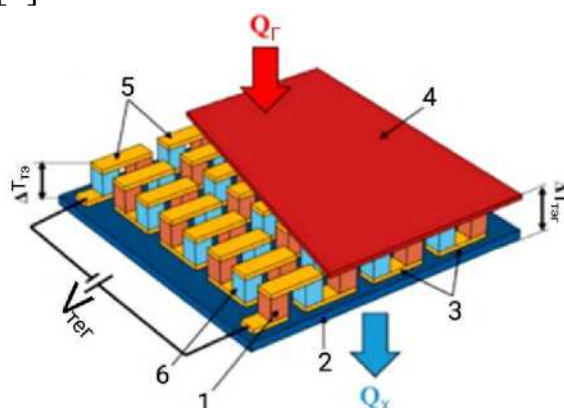


Рис. 3. Смешанная конфигурация элемента Пельтье. 1 - n-тип; 2 - холодная сторона пластины; 3 - холодный контакт; 4 - горячая сторона пластины; 5 - горячий контакт; 6 - p-тип.

Принцип работы термоэлектрического генератора (ТЭГ), как говорилось выше, основан на эффекте Зеебека, заключающемся в возникновении электрического напряжения в цепи из разнородных материалов при наличии разницы температур. Для генерации электроэнергии к одной стороне модуля подводится тепло, создавая перепад температур ( $\Delta T$ ) между горячей ( $T_{\text{Г}}$ ) и холодной ( $T_{\text{Х}}$ ) сторонами. Под действием этого градиента носители заряда - электроны в n-материале и дырки в p-материале - диффундируют от горячего спае к холодному, генерируя напряжение холостого хода ( $V_0$ ), пропорциональное  $\Delta T$ . При подключении нагрузки в цепи возникает ток, и на нагрузке выделяется полезная электрическая мощность. При работе под нагрузкой проявляются сопутствующие эффекты: эффект Пельтье, который поглощает тепло на горячем спае и выделяет на холодном, и джоулев нагрев, паразитно повышающий

температуру обоих спаев [7]. Для достижения максимальной мощности необходимо согласование сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением ТЭГ [7]. Эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую напрямую зависит от величины  $\Delta T$  и термоэлектрической добротности ( $ZT$ ) материала, причём для практического применения требуются материалы с  $ZT \geq 1$  [7].

В исследовании [8] изучалась возможность применения термоэлектрического генератора в качестве вспомогательного источника питания для электромобилей с увеличенным запасом хода. Была разработана и запатентована специальная двухступенчатая рекуперативная конструкция ТЭГ с повторным нагревом, показавшая наилучшие характеристики эффективности и удельной работы.

Первоначальные испытания показали, что базовая конфигурация ТЭГ уступает традиционному двигателю внутреннего сгорания, потребляя на 33% больше топлива. Однако дальнейший анализ выявил значительный потенциал для оптимизации системы. За счет модернизации ключевых компонентов - теплообменников, камеры сгорания и термоэлектрических модулей - эффективность системы может быть повышена до 39%.

Моделирование работы оптимизированного ТЭГ с эффективностью 39% продемонстрировало преимущество над двигателем внутреннего сгорания: при одинаковых условиях работы традиционный ДВС потребляет на 7,7% больше топлива. Это подтверждает перспективность дальнейшего развития термоэлектрических генераторов для применения в гибридных транспортных средствах при условии достижения высоких показателей эффективности системы [8].

### **Библиографический список**

1. Yuan D. Technology method and functional characteristics of road thermoelectric generator system based on Seebeck effect / D. Yuan, W. Jiang, A. Sha, J. Xiao, W. Wu, T. Wang // *Applied Energy*. - 2023. - Vol. 332. - Art. 120489. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120489>. (дата обращения: 06.11.2025)
2. Wang J. Design and application of a cooling device based on Peltier effect coupled with electrohydrodynamics / J. Wang, J. Wang, Z. Long, T. Zhu, Z. Li, Z. Jiang, J. Liu // *Energy Conversion and Management*. - 2021. - Vol. 234. - Art. 113945. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113945>. (дата обращения: 06.11.2025).
3. Shilpa M. K. A Systematic Review of Thermoelectric Peltier Devices: Applications and Limitations / M. K. Shilpa, M. A. Raheman, A. Aabid, M. Baig, R. K. Veerasha, N. Kudva // *Energies*. - 2023. - Vol. 16, № 4. - P. 2019. - DOI: <https://doi.org/10.3390/en16042019>. (дата обращения: 06.11.2025).
4. Zhu S. Review on Wearable Thermoelectric Generators: From Devices to Applications / S. Zhu, Z. Fan, B. Feng, R. Shi, Z. Jiang, Y. Peng, J. Gao, L.

- Miao, K. Koumoto // *Energies*. - 2022. - Vol. 15, № 9. - P. 3375. - DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093375>. (дата обращения: 06.11.2025).
5. Win S. L. Y. Thermoelectric Generator Applications in Buildings: A Review / S. L. Y. Win, Y. Chiang, T. Huang, C. Lai // *Energies*. - 2024. - Vol. 17, № 17. - P. 4326. - DOI: <https://doi.org/10.3390/en17174326>. (дата обращения: 06.11.2025).
  6. d'Angelo M. Thermoelectric Materials and Applications: A Review / M. d'Angelo, C. Galassi, N. Lecis // *Energies*. - 2023. - Vol. 16, № 17. - P. 6359. - DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176359>. (дата обращения: 06.11.2025).
  7. Ridwan M. Principle and Applications of Thermoelectric Generators: A Review / M. Ridwan, M. Gasulla, F. Reverter // *Energies*. - 2025. - Vol. 18, № 8. - P. 1941. - DOI: <https://doi.org/10.3390/en18081941>. (дата обращения: 06.11.2025).
  8. Yousefi E. Waste heat management in electric motors using thermoelectric generator integrated with phase change material and metal foam- embedded heat sink / E. Yousefi, A. A. Nejad // *Energy Conversion and Management*. - 2024. - Vol. 301. - Art. 118047. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118047>. (дата обращения: 06.11.2025).

© Мусин Р.М., 2025

**Г.О. ПОНОМАРЕВ**

glebik\_2019@mail.ru

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

*Уфимский университет науки и технологий*

## **Энергия черной дыры для электротранспорта: вызовы и решения**

*Аннотация:* в данной работе предпринята попытка рассмотреть один из самых необычных потенциальных источников энергии для электротранспорта будущего. Рассматриваются теоретические механизмы генерации энергии, технические проблемы передачи и преобразования энергии, а также перспективы интеграции в энергосистему. Особое внимание уделено связи концепции с развитием инфраструктуры заряда, производством новых материалов и системами накопления энергии.

Современный электротранспорт сталкивается с фундаментальной проблемой ограниченности традиционных источников энергии [5, 12]. Согласно прогнозам Международного энергетического агентства, к 2040 году мировой парк электромобилей может достичь 2 миллиардов единиц, что потребует увеличения генерирующих мощностей на 15-20% от текущего уровня потребления [12]. Существующие решения на основе возобновляемых источников энергии и атомной энергетики имеют существенные ограничения по масштабируемости и экологической эффективности [5]. В данном контексте представляет значительный научный и практический интерес анализ потенциального использования энергии черной дыры как перспективного источника энергии для электротранспорта будущего.

Основой для рассмотрения концепции послужили фундаментальные работы Стивена Хокинга [1], который в 1974 году теоретически доказал возможность квантового излучения черными дырами. Согласно теории Хокинга, на границе горизонта событий происходят квантовые флуктуации, приводящие к рождению пар частица-античастица. Одна из частиц падает в черную дыру, а другая улетает в космическое пространство, что с точки зрения удаленного наблюдателя выглядит как тепловое излучение черной дыры [1].

Проведенные расчеты показывают, что микроскопическая черная дыра массой порядка  $10^{12}$  кг (сравнима с массой горы Эверест) способна генерировать мощность до  $10^{11}$  Вт, что позволяет питать 5 миллионов электромобилей, что превышает возможности крупнейших современных электростанций [3].

Дополнительный механизм извлечения энергии был предложен Роджером Пенроузом в 1969 году [2]. Его теория описывает процесс извлечения энергии из вращающейся черной дыры (метрики Керра) через эргосферу – область, расположенную между горизонтом событий и пределом статичности. В этой

области пространство-время вращается вместе с черной дырой, что позволяет извлекать энергию через разделение падающих частиц [2].

Еще одним потенциальным источником энергии является аккреционный диск - вещество, падающее на черную дыру и разогревающееся до температур в миллионы градусов за счет трения и гравитационного сжатия. Энергия аккреционного диска может преобразовываться в электрическую с помощью термоэлектрических генераторов или через систему зеркал и турбин [6].

Анализ современных тенденций развития электротранспорта позволяет выделить несколько ключевых направлений потенциального применения энергии черной дыры:

Системы мегаваттной зарядки (MCS) для коммерческого транспорта требуют мощности до 3,5 МВт на одну станцию [10]. Энергия черной дыры могла бы обеспечить питание сети таких станций без необходимости создания протяженных линий электропередачи. Передача энергии могла бы осуществляться с помощью направленного микроволнового или лазерного луча [4].

Производство водорода для грузового транспорта методом электролиза требует значительных энергозатрат. Согласно исследованиям [12], для перевода всего грузового транспорта на водородные топливные элементы потребуется около 3000 ТВт·ч в год, что составляет примерно 10% от современного мирового энергопотребления.

Решение проблемы пиковых нагрузок в энергосетях, вызванных одновременной зарядкой миллионов электромобилей в вечерние часы [7]. Постоянный поток энергии из космоса позволил бы отказаться от использования пиковых углеводородных электростанций.

Питание инфраструктуры для электрической авиации (eVTOL) и гиперпетлей, которые требуют энергии в масштабах, недостижимых для традиционных источников [10].

В таблице 1 систематизированы основные проблемы и потенциальные пути их решения на современном уровне развития технологий.

*Таблица 1*

Проблемы и решения в реализации концепции

Проблема	Потенциальное решение	Перспективы реализации
Низкий КПД беспроводной передачи энергии (не более 85% на современных технологиях) [4]	Разработка новых материалов на высокотемпературной сверхпроводимости и метаматериалов	Среднесрочная перспектива (15-20 лет)
Непостоянство мощности черной дыры из-за колебаний аккреционного потока [5]	Создание систем накопления энергии колоссальной емкости на основе гравитационных накопителей	Долгосрочная перспектива (25-30 лет)



Вопросы безопасности контроля искусственной черной дыры [11]	Разработка систем мониторинга и управления на основе квантовых вычислений	Долгосрочная перспектива
Необходимость создания новой космической инфраструктуры [3]	Поэтапное развитие технологий с использованием существующих космических аппаратов	Среднесрочная перспектива
Высокая стоимость реализации проекта [5]	Международное сотрудничество и поэтапное финансирование	Долгосрочная перспектива

Для практической реализации концепции потребуется решение ряда технических задач. Система передачи энергии должна включать орбитальные преобразователи, способные работать в условиях интенсивного излучения вблизи черной дыры. Современные исследования в области материаловедения показывают перспективность использования карбида кремния и алмазоподобных покрытий для работы в экстремальных условиях [6].

Наземная инфраструктура приема энергии потребует создания сетей ректенн площадью в несколько квадратных километров. Согласно исследованиям [4], современные прототипы таких систем демонстрируют эффективность преобразования до 85%, но для практического применения необходимо достижение показателей не менее 95%.

Системы накопления энергии должны быть способны аккумулировать гигаواتт-часы энергии для компенсации суточных колебаний потребления. Перспективными направлениями являются гравитационные накопители на основе подъема грузов и тепловые аккумуляторы с фазовым переходом [5].

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Теоретическая возможность использования энергии черной дыры имеет серьезное научное обоснование, однако техническая реализация проекта требует преодоления значительных проблем.
2. Основные проблемы включают недостаточную эффективность беспроводной передачи энергии, необходимость создания систем накопления колоссальной емкости и решение вопросов безопасности.
3. Развитие технологий для реализации данной концепции будет способствовать прогрессу в смежных областях, включая материаловедение, космические технологии и системы управления энергопотоками.
4. Даже при гипотетическом характере самой идеи, ее исследование стимулирует развитие критически важных технологий для электротранспорта будущего.

## Библиографический список

1. Hawking S. W. Black hole explosions / S. W. Hawking // Nature. - 1974. - Vol. 248, № 5443. - P. 30-31. (дата обращения: 04.11.2025).
2. Penrose R. Gravitational collapse: The role of general relativity / R. Penrose // Rivista Del Nuovo Cimento. - 1969. - Vol. 1. - P. 252-276. (дата обращения: 04.11.2025).
3. Space-Based Solar Power: офиц. отчет / NASA. - 2021. - 45 p. (дата обращения: 04.11.2025).
4. Wireless Power Transmission Technologies for Space Applications: материалы конференции / IEEE. - 2022. - 112 p. (дата обращения: 04.11.2025).
5. Energy Storage Market Outlook / BloombergNEF. - 2023. - 89 p. (дата обращения: 04.11.2025).
6. Space Solar Power Initiative: науч. статья / Caltech. - 2020. - 67 p. (дата обращения: 04.11.2025).
7. Smart Grid Solutions for Future Energy Systems: техн. доклад / Siemens. - 2022. - 54 p. (дата обращения: 04.11.2025).
8. Thorn K. Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy / K. Thorn. - New York: W. W. Norton & Company, 1994. - 478 p. (дата обращения: 04.11.2025).
9. Reynolds A. Pushing Ice / A. Reynolds. - London: Gollancz, 2005. - 512 p. (дата обращения: 04.11.2025).
10. Megawatt Charging Standard for Electric Trucks: техн. отчет / U.S. Department of Energy. - 2023. - 33 p. (дата обращения: 04.11.2025).
11. Unruh W. G. Second quantization in the Kerr metric / W. G. Unruh // Physical Review D. - 1974. - Vol. 10, № 10. - P. 3194-3205. (дата обращения: 04.11.2025).
12. Global EV Outlook 2024 / International Energy Agency. - 2024. - 102 p. (дата обращения: 04.11.2025).

© Пономарев Г.О., 2025

**И.Р. САЛИМХАНОВ**

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

*Уфимский университет науки и технологий*

### **Математические методы оптимизации режимов энергосистем**

*Аннотация:* целью работы – является сделать обзор математических методов оптимизации режимов энергосистем.

Предметом исследования – методы оптимизации режимов энергосистем.

*Ключевые слова:* электроэнергетика, энергосистема, методы оптимизации.

Оптимизация в электроэнергетике – это процесс поиска наиболее предпочтительных режимов работы энергосистемы с точки зрения определённого критерия (оптимума). Основные критерии включают минимизацию издержек (на сооружение, эксплуатацию, расход топлива), минимизацию потерь активной мощности, а также качественные показатели (экология, надёжность, качество электроснабжения). Задачи оптимизации в энергосистемах характеризуются многокритериальностью и многомерностью, что требует применения специальных математических методов.

### **Основные задачи оптимизации в электроэнергетике**

1. Оптимизация стратегии развития: Выбор расположения, мощности объектов, сроков ввода.;
2. Выбор оптимальной конфигурации электрической сети;
3. Оптимизация распределения активной нагрузки между электростанциями: Минимизация расхода условного топлива;
4. Оптимизация параметров режима электросети: Минимизация потерь активной мощности при передаче электроэнергии (регулирование напряжений, коэффициентов трансформации, мощностей компенсирующих устройств);
5. Комплексная оптимизация: Одновременная оптимизация параметров электростанций и электросети.

При решении этих задач всегда учитываются ограничения, такие как технические характеристики оборудования, пропускные способности линий, допустимые уровни напряжений, ограничения по гидроресурсам (для ГЭС) и требования к надёжности и качеству электроэнергии.

## Классификация математических методов оптимизации

### 1. Метод множителей Лагранжа (аналитический метод)

- Суть метода:

Позволяет найти условный экстремум целевой функции при наличии ограничений в форме равенств. Формируется функция Лагранжа (целевая функция + сумма произведений множителей Лагранжа на функции ограничений), затем её частные производные по всем переменным (включая множители Лагранжа) приравняются к нулю.

- Применение:

- Оптимизация распределения нагрузки между ТЭС: Критерием является минимизация суммарного расхода топлива. Условие оптимальности – равенство относительных приростов расхода топлива для всех ТЭС, скорректированных на относительный прирост потерь активной мощности в сети:  $b_i / (1 - \sigma_i) = \text{idem}$ . Физический смысл: перераспределение нагрузки от менее экономичного агрегата к более экономичному выгодно до тех пор, пока их относительные приросты не сравниваются.

- Оптимизация распределения нагрузки в гидротепловых энергосистемах: Учитывает расход топлива ТЭС и расход гидроресурсов ГЭС. Множитель Лагранжа ( $\lambda$ ) в этом случае приобретает физический смысл меры эффективности использования гидроресурсов (сколько топлива ТЭС экономится при увеличении расхода гидроресурса ГЭС). При переменном напоре ГЭС значение  $\lambda$  меняется, что усложняет задачу.

- Ограничения: Метод Лагранжа эффективно работает только с ограничениями в форме равенств. Если оптимальное значение параметра выходит за пределы неравенства, его просто фиксируют на граничном значении, что не всегда является истинным оптимумом. Также метод предполагает непрерывность расходных характеристик, что не всегда выполняется для отдельных агрегатов.

### 2. Итерационные методы (Численные методы)

2.1. Суть: Начинают с произвольного начального приближения и последовательно (пошагово) улучшают значение целевой функции, приближаясь к оптимуму.

2.2. Общая рекуррентная формула:  $X^{(K+1)} = X^K + q^{(K+1)} * \Delta X^{(K+1)}$ , где  $X$  – вектор параметров,  $q$  – длина шага,  $\Delta X$  – направление спуска.

#### 2.1 Методы возможных направлений (Градиентные методы):

\* Градиент ( $\nabla F$ ) : указывает направление наискорейшего роста целевой функции.

\* Антиградиент ( $-\nabla F$ ) : указывает направление наискорейшего

убывания (наискорейшего спуска).

\* Длина шага (q): Может быть постоянной или оптимизироваться на каждом шаге (например, путём аппроксимации целевой функции полиномом второй степени вдоль направления спуска).

## 2.2 Метод покоординатной оптимизации:

\* Суть: Движение к оптимуму осуществляется последовательно вдоль каждой из координатных осей (изменяется один параметр, остальные фиксированы).

\* Первый итерационный шаг в точку  $X^{(1)}$

$$x_1^{(1)} = 1, x_2^{(1)} = 0, x_3^{(1)} = 0$$

$$x_1^{(1)} = 1, x_2^{(1)} = 0, x_3^{(1)} = 0$$

Второй итерационный шаг в точку  $X^{(2)}$

$$x_1^{(2)} = 1, x_2^{(2)} = 0, x_3^{(2)} = 0$$

$$x_1^{(2)} = 1, x_2^{(2)} = 0, x_3^{(2)} = 0$$

\* Преимущества: Простота алгоритма, малый объём вычислений на каждом шаге.

\* Недостатки: Возможна медленная сходимость, особенно в "узких долинах" целевой функции.

## 2.3 Градиентные методы (Метод наискорейшего спуска):

\* Суть: На каждом шаге движение происходит в направлении антиградиента целевой функции.

\* Рекуррентная формула  $x_{k+1} = x_k - \alpha \nabla f(x_k)$

\* Преимущества: Более быстрая сходимость по сравнению с покоординатным методом.

\* Недостатки: Вычислительная схема сложнее, объём вычислений больше.

## 2.4 Метод Ньютона (Обобщённый метод Ньютона):

\* Суть: Целевая функция аппроксимируется полиномом второй степени в окрестности текущей точки. Экстремум аппроксимирующей функции находится аналитически. Требуется вычисления первой и второй производных (матрицы Гессе).

\* Преимущества: Очень быстрая сходимость (часто за несколько итераций), особенно если целевая функция близка к квадратичной (что характерно для расходных характеристик ТЭС).

\* Недостатки: Вычислительно сложен, требует расчёта и обращения матрицы Гессе, что может быть затратно для больших систем.

## **2.5 Критерии сходимости итерационных процессов:**

\* Поправка целевой функции: Абсолютное или относительное изменение целевой функции между итерациями меньше заданной малой величины ( $\varepsilon$ ).

\* Длина градиента: Норма градиента целевой функции становится меньше заданной малой величины ( $\mu$ ). Этот критерий более надёжен, так как напрямую указывает на близость к экстремуму.

## **3. Учёт ограничений при решении задач оптимизации**

### **3.1 Учёт ограничений в форме равенств (Метод приведённого градиента):**

- Суть: Использует уравнения связи (равенства) для выражения зависимых параметров через независимые, тем самым уменьшая размерность задачи. Градиент целевой функции вычисляется в пространстве независимых переменных, учитывая их влияние на зависимые через уравнения связи.

- Применение: Широко используется для решения задач комплексной оптимизации режимов энергосистем, где уравнения баланса активной и реактивной мощностей являются основными ограничениями-равенствами.

### **3.2 Учёт ограничений в форме неравенств (Метод штрафных функций):**

- Суть: Преобразует задачу условной оптимизации с неравенствами в задачу безусловной оптимизации путём добавления к целевой функции "штрафной функции". Штрафная функция равна нулю, если ограничения выполняются, и принимает положительное, быстро возрастающее значение при их нарушении.

- Применение: Позволяет учитывать технические ограничения (например, пределы мощности генераторов, напряжения узлов, пропускной способности линий).

- Особенности: Скорость роста штрафа должна быть выше, чем убывание целевой функции при нарушении ограничений. Выбор коэффициентов штрафной функции влияет на сходимость.

## **4. Комплексная оптимизация режимов энергосистемы (с использованием метода приведенного градиента)**

Предполагает одновременную оптимизацию параметров электростанций (активные и реактивные мощности) и электросети (модули и фазы узловых напряжений, коэффициенты трансформации). Целью является минимизация суммарного расхода топлива и потерь активной мощности. Метод приведённого градиента позволяет эффективно решать такие задачи, учитывая уравнения баланса мощностей как равенства и другие технические ограничения как неравенства (с помощью штрафных функций).

## **Заключение**

- Метод Лагранжа прост для непрерывных функций и равенств, но ограничен в работе с неравенствами и дискретными характеристиками.
- Покоординатный метод прост в реализации, но медленно сходится.
- Градиентные методы (включая метод наискорейшего спуска) обеспечивают более быструю сходимость.
- Метод Ньютона является наиболее эффективным с точки зрения скорости сходимости, особенно для функций, хорошо аппроксимируемых полиномами второй степени (что часто встречается в электроэнергетике).
- Метод приведённого градиента в сочетании с методом штрафных функций является мощным инструментом для решения комплексных задач оптимизации в энергосистемах, позволяя учитывать, как равенства (балансы мощностей), так и неравенства (технические ограничения).

Выбор конкретного метода зависит от сложности задачи, характера целевой функции и ограничений, а также от требуемой точности и доступных вычислительных ресурсов.

## **Библиографический список**

1. Ф.Р. Исмагилов, Д.В. Максудов Математические методы оптимизции режимов энергосистемы: учебное пособие / Ф.Р. Исмагилов, Д.В. Максудов. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т – Уфа: УГАТУ, 2007. – 105 с. (дата обращения 06.11.2025).

© Салимханов И.Р., 2025

**Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ, А.И. ШАЙХЛИСЛАМОВ**

sultangareev.damir@mail.ru, aidar.sh0411@gmail.com

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

*Уфимский университет науки и технологий*

## **Обзор перспективных решений обмоток электрических машин**

*Аннотация:* в статье представлен систематический анализ современных технологий формирования обмоток для электрических машин с удельными характеристиками 5 кВт/кг и выше. Проведен сравнительный обзор технологий Hairpin, Wave - winding, обмоток с литцендратом, прессованных катушек и систем непосредственного охлаждения. Особое внимание уделено комплексному рассмотрению электромагнитных и тепловых аспектов выбору типа обмоток.

*Ключевые слова:* электрические машины, обмотки статора, удельная мощность, Hairpin - обмотки, литцендрат, волновые обмотки, прессованные катушки, тепловые режимы.

### **1. Введение**

Современные требования к электромеханическим преобразователям в области транспорта, авиации и промышленных приводов характеризуются стремлением к достижению экстремальных значений удельной мощности (5 кВт/кг и выше) [1]. Традиционные технологии обмоток становятся основным ограничением для дальнейшего совершенствования массогабаритных показателей электрических машин. В связи с этим актуальной задачей является комплексный анализ перспективных решений в области конструкций обмоток, способных обеспечить прорывные характеристики.

### **2. Классификация перспективных технологий обмоток**

#### **2.1. Предварительно сформированные обмотки (Hairpin и Wave - winding)**

Технология Hairpin предполагает использование прямоугольных проводников, предварительно изогнутых в U - образной форме [2]. Основные преимущества:

- Высокая удельная мощность - коэффициент заполнения паза 0,70-0,75 (на 25-30% выше традиционных обмоток) за счет применения прямоугольных проводников оптимизированной геометрии;
- Эффективный теплоотвод - снижение термического сопротивления на 40-60% благодаря формированию непрерывной тепловой цепи "проводник-



изоляция-магнитопровод ", что позволяет увеличить токовую нагрузку на 15-20%;

- Механическая стабильность - увеличение модуля упругости в 2-3 раза и собственной частоты колебаний на 40-60% за счет создания жесткой композитной структуры, обеспечивающей сохранение параметров при вибрациях и термоциклировании.

Wave-winding (волновая обмотка) представляет дальнейшее развитие технологии, позволяющее уменьшить длину лобовых частей на 15-20% [3]. Это достигается за счет специальной геометрии укладки, уменьшающей общую длину проводника и снижающей омические потери.

## **2.2. Обмотки с подавлением поверхностного эффекта**

Для высокочастотных применений (выше 1000 Гц) перспективными являются:

- Литцендрат - многожильный провод с транспозицией элементарных проводников;
- Обмотки с прямоугольными проводниками малой толщины (менее 1 мм);
- Комбинированные решения с сегментированием проводников.

Экспериментальные исследования показывают снижение высокочастотных потерь на 40-60% по сравнению с традиционными решениями [4].

## **2.3. Прессованные катушки**

Технология прессованных катушек основана на использовании предварительно сформированных и уплотненных под высоким давлением медных проводников [5]. Ключевые особенности:

- Максимальное заполнение паза 0,80-0,85 благодаря изостатическому прессованию (150-200 МПа), что на 25-30% эффективнее Hairpin-технологий;
- Интегрированное охлаждение через каналы диаметром 0,5-1,0 мм для прямого отвода тепла из активной зоны;
- Повышенная вибропрочность (в 2,5-3 раза) за счет монолитной структуры с модулем упругости 12-15 ГПа;
- Высокая теплопроводность 2,8-3,5 Вт/м\*К благодаря нанокompозитным материалам и отсутствию воздушных зазоров.

### **3. Тепловые аспекты и системы охлаждения**

Современные тенденции в проектировании электрических машин требуют интеграции систем охлаждения непосредственно в структуру обмотки, что обусловлено предельными тепловыми режимами работы современных электромеханических преобразователей. При достижении удельных мощностей свыше 5 кВт/кг традиционные системы внешнего охлаждения демонстрируют принципиальную неэффективность, связанную с критическим возрастанием теплового сопротивления зоны "обмотка-корпус" и существенной неравномерностью тепловыделения в пазовой области [1].

#### **3.1. Прямое охлаждение проводников**

- Прямое охлаждение - полые проводники с каналами 0,5-2,0 мм обеспечивают теплосъем до 3-4 кВт/дм<sup>2</sup>;
- Теплопроводные пропитки - нанокompозитные составы (до 1,5 Вт/м\*К) снижают межвитковое термическое сопротивление на 40-60%;
- Теплопроводящая изоляция - керамические покрытия и полимерные пленки (2-8 Вт/м\*К) обеспечивают электрическую прочность до 30 кВ/мм;
- Интегрированные каналы - каналы диаметром 0,5-1,0 мм в прессованных катушках для принудительной конвекции в зонах максимальных потерь [5].

#### **3.2. Тепловое моделирование**

Современные методы CFD - моделирования позволяют оптимизировать тепловые режимы с точностью до 5-7% [6]. Особое внимание уделяется:

- Распределению температурных полей в пазовой зоне. Моделирование трехмерного температурного профиля с учетом неравномерности тепловыделения от скин-эффекта и потерь в магнитопроводе. Выявление локальных перегревов в межвитковых пространствах;
- Тепловым контактам между проводниками. Анализ термических сопротивлений в зонах контакта проводников с точным учетом шероховатости поверхностей, давления прессования и свойств пропиточных материалов;
- Эффективности отвода тепла от лобовых частей. Оптимизация конвективного теплообмена сложнопрофильных лобовых частей с учетом турбулентности потока охлаждающей среды и радиационного теплообмена.

#### 4. Сравнительный анализ технологий

Таблица 1

Сравнительные характеристики различных технологий обмоток [7-17]

Параметр	Традиционная	Hairpin	Wave-winding	Литцендрат	Прессованные катушки
Изображение					
Коэффициент заполнения	0,45-0,55	0,70-0,75	0,68-0,72	0,35-0,45	0,80-0,85
Стоимость изготовления	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя	Очень высокая
Сложность автоматизации	Средняя	Высокая	Высокая	Низкая	Очень высокая
Эффективность при $f > 1$ кГц	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая
Теплоотвод	Средний	Хороший	Хороший	Низкий	Отличный
Вибропрочность, g	5-8	10-12	8-10	6-9	25-30

Сравнительный анализ обмоточных технологий выявил следующие закономерности:

- По плотности укладки: прессованные катушки (0,80-0,85) превосходят Hairpin-технология на 15-20%, тогда как литцендрат имеет минимальный коэффициент заполнения;
- По экономической эффективности: существует прямая корреляция между коэффициентом заполнения и себестоимостью. Традиционная технология наиболее экономична, прессованные катушки требуют максимальных инвестиций;
- По частотным характеристикам: литцендрат и прессованные катушки эффективны на высоких частотах ( $>1$  кГц), тогда как традиционные обмотки непригодны для ВЧ-применений;
- По тепловым и механическим свойствам: прессованные катушки демонстрируют превосходные характеристики, Hairpin и Wave-winding - удовлетворительные, литцендрат - наихудшие из-за наличия воздушных полостей.

Перспективное направление - разработка гибридных решений, комбинирующих преимущества различных технологий для конкретных применений.

## Заключение

Проведенный обзор показывает, что дальнейшее развитие электрических машин требует комплексного подхода к проектированию обмоток. Наиболее перспективными являются технологии, позволяющие одновременно улучшить электромагнитные, тепловые и механические характеристики. Технология изготовления прессованных катушек демонстрирует наилучшие показатели по коэффициенту заполнения и тепловым характеристикам [5], однако требует решения задач по снижению стоимости изготовления.

Особое внимание следует уделять технологичности изготовления и стоимости производства, что определяет практическую реализуемость рассмотренных решений [1, 2, 5].

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку адаптивных систем, способных оптимизировать свои характеристики в различных режимах работы, а также на создание экономически эффективных производственных процессов для массового внедрения перспективных технологий.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-29-00675 «Разработка фундаментальных научных основ высокоэффективного электромеханического преобразователя энергии с повышенными удельными характеристиками и элементов гибридной силовой установки».*

## Библиографический список

1. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D. et al. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2009. - Vol. 56, № 3. - P. 871-882 (дата обращения 06.11.2025).
2. Mellor P. H., Wrobel R., McNeill N. Investigation of Proximity Losses in a High Speed Brushless Permanent Magnet Motor // Proceedings of the 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. - 2009. - P. 3163-3170 (дата обращения 06.11.2025).
3. Holmes A. S., Hong G., Pullen K. R. Axial Flux Brushless Permanent Magnet Machines with Modified Airgap Windings // IEEE Transactions on Industry Applications. - 2005. - Vol. 41, № 3. - P. 712-720 (дата обращения 07.11.2025).
4. Kulan M. C., Wrobel R., Baker N. J. AC Loss Reduction in Hairpin Windings via Conductor Level Segmentation // 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). - 2020. - Vol. 1. - P. 1404-1410 (дата обращения 06.11.2025).
5. Gonzalez D. A., Skaar R., Eilenberger A. Advanced Pressed Coil Technology for High Power Density Traction Motors // Proceedings of the 2023 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). - 2023. - P. 1-6 (дата обращения 06.11.2025).
6. Staton D., De Almeida A. T. Advanced Computational Models for Accurate Thermal Analysis of Electrical Machines // 2018 XIII International Conference on

- Electrical Machines (ICEM). - 2018. - P. 1889-1895 (дата обращения 07.11.2025).
7. G. J. Atkinson, S. M. AbuSharkh, J. W. Mecrow. "Impact of Stator Winding Construction on Efficiency and Performance of Permanent Magnet Machines" // IET Electric Power Applications. - 2018. - Vol. 12, Iss. 2. - Pp. 162-169 (дата обращения 06.11.2025).
  8. D. Ishak, Z. Q. Zhu, D. Howe. "Comparison of PM Brushless Motors, Having Either All Teeth or Alternate Teeth Wound" // IEEE Transactions on Energy Conversion. - 2006. - Vol. 21, No. 1. - Pp. 95-103 (дата обращения 07.11.2025).
  9. A. M. EL-Refaie, M. R. Shah, R. Qu. "High Specific Power Electrical Machines: A System Perspective" // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. - 2019. - Vol. 3, No. 1. - Pp. 88-100 (дата обращения 07.11.2025).
  10. P. D. T. O. G. Pellerey, V. Lanfranchi, G. Friedrich. "Hairpin Windings: A Solution for High Power Density Traction Motors" // 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). - 2020. - Vol. 1. - Pp. 2459-2465 (дата обращения 07.11.2025).
  11. J. W. Kolar, J. M. Guerin, U. Drofenik. "The Impact of Hairpin Winding Technology on the Stiffness and NVH Behavior of Electric Traction Motors" // 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). - 2021. - Pp. 258-263 (дата обращения 07.11.2025).
  12. "Advanced Wave Winding for High-Speed Electric Machines" // 2022 International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD). - 2022. - Pp. 554-559 (дата обращения 07.11.2025).
  13. T. G. Miller, M. O. M. A. M. "Automated Production of Wave Windings for EV Traction Motors: Challenges and Solutions" // IEEE Transactions on Industry Applications. - 2023. - Vol. 59, No. 1. - Pp. 456-465 (дата обращения 06.11.2025).
  14. M. C. Kulan, N. J. Baker, R. Wrobel. "AC Loss Characterization of Litz Wire for High-Speed Aerospace Motors" // IEEE Transactions on Industry Applications. - 2022. - Vol. 58, No. 2. - Pp. 2134-2145 (дата обращения 07.11.2025).
  15. J. A. d. R. Barrera, S. D. Round, R. L. M. Hofsjager. "Thermal Performance of Litz-Wire Windings in High-Frequency Inductors" // IEEE Transactions on Power Electronics. - 2019. - Vol. 34, No. 7. - Pp. 6325-6336 (дата обращения 07.11.2025).
  16. D. A. Gonzalez, A. Eilenberger, R. Skaar. "Ultra-High Slot Fill Factor Pressed Coil Technology for Next-Generation Traction Motors " // 2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). - 2023. - Pp. 1124-1130 (дата обращения 07.11.2025).
  17. K. Y. Liu, P. S. S. S. M. B. G. "Economic and Manufacturing Challenges of Press-Fit and Encapsulated Stator Windings " // Proceedings of the 2022 International Electric Machine Drives Conference (IEMDC). - 2022. - Pp. 1-8 (дата обращения 07.11.2025).

**Ф.С. ХАМЗИН, Г.Р. ИБАТУЛИНА, А.И. ТАТАУРОВ**

*hamzinfan@yandex.ru, gulnur5@list.ru, tataurov.ai@ugatu.su.*

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

*Уфимский университет науки и технологий*

### **Исследование локальных повреждений магнитной системы ротора электрической машины методом магнитно-полевого анализа**

*Аннотация:* в работе рассмотрено влияние механических и термических повреждений постоянных магнитов ротора электрической машины на распределение магнитного поля. Проведено экспериментальное исследование с применением индикаторной магнитной бумаги и измерений индукции гауссметром. Полученные результаты показали, что локальные трещины и перегрев постоянных магнитов вызывают неравномерность магнитного поля и снижение магнитной индукции, что подтверждает деградацию магнитных свойств ротора.

*Ключевые слова:* постоянные магниты, ротор, электрическая машина, магнитное поле, индукция.

### **Введение**

Постоянные магниты в роторе синхронной машины определяют форму магнитного поля и величину магнитного потока, участвующего в создании электромагнитного момента. Любое повреждение, механическое или термическое, приводит к неравномерному распределению магнитной индукции по окружности ротора, что нарушает симметрию поля и баланс магнитных сил.

К механическим повреждениям относят трещины, сколы, частичное/полное разрушение или отслоение магнитов от ротора, что приводит к локальному нарушению однородности магнитного поля и изменению воздушного зазора между ротором и статором, как следствие появления асимметрии электромагнитных сил. Даже незначительные дефекты создают асимметрию магнитного потока, вызывая рост пульсаций электромагнитного момента, вибраций и уровня шума [1]. При развитии трещин часть магнита теряет намагниченность, появляются зоны ослабления поля, что снижает КПД и вызывает рост зубцового момента [2]. При отрыве или смещении магнита нарушается балансировка ротора, возможен контакт ротора со статором и дальнейшее разрушение поверхности. В совокупности эти дефекты не только ухудшают электромагнитные характеристики, но и ускоряют деградацию механических узлов машины.

Термические повреждения постоянных магнитов возникают при локальном перегреве ротора из-за вихревых токов, плохого охлаждения,



повышенных токов нагрузки или сил трения, из-за недостаточного зазора между ротором и статором. При превышении критической температуры магнита (80-120°C для неодимовых магнитов) происходит частичная демагнитизация – снижение остаточной индукции и коэрцитивной силы, что приводит к необратимой потере магнитного потока [1]. Неравномерный нагрев вызывает термомеханические напряжения, микротрещины и отслоения покрытия [3]. Эти процессы вызывают искажение поля, рост гармоник ЭДС и снижение эффективности работы машины.

### **Экспериментальная оценка механических и термических повреждений магнитов ротора**

В рамках данного раздела приведены результаты экспериментального исследования ротора электрической машины, вышедшего из строя вследствие локального механического контакта со статором и последующего термического воздействия на постоянные магниты. Для оценки характера повреждений и распределения магнитного поля использовались визуальные методы с применением индикаторной магнитной бумаги и прямые измерения магнитной индукции гауссметром.

В ходе осмотра ротора, представленного на рисунках 1-2, выявлены две диаметрально противоположные зоны локальных повреждений.



*Рис. 1.* Пакет ротора: зона локального повреждения



*Рис. 2.* Пакет ротора: трещина в магните

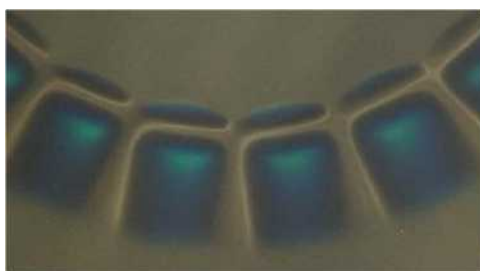
Поверхность пакета ротора в указанных участках имеет повышенную шероховатость изменение цвета с металлического серебристого до темно-коричневого или черного. Сопоставление оттенков поверхности ротора с известными таблицами цветов побежалости металлов позволяет оценить температуру локального нагрева как порядка 300-350°C, что подтверждает термическое воздействие на постоянные магниты.

### **Результаты визуального осмотра с применением индикаторной магнитной бумагой**

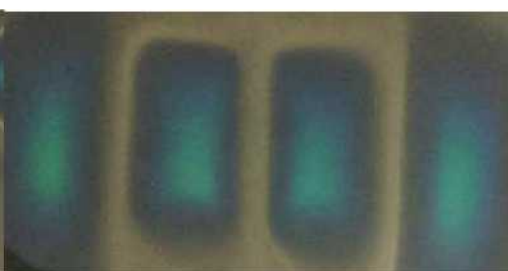
Индикаторная магнитная бумага представляет собой тонкий полимерный материал, чувствительный к магнитному полю. На его поверхности находятся ферромагнитные микрочастицы, которые изменяют оптические свойства под действием внешнего магнитного поля. При наложении такой бумаги на поверхность ротора становится видимым распределение полюсов и границ магнитов в виде чередующихся цветных участков. Метод позволяет наглядно выявить неоднородности магнитного поля, смещение или ослабление отдельных полюсов, а также оценить симметрию поля после повреждений без разрушения самих магнитов.

На рисунках 3-8 представлены результаты визуализации магнитного поля с использованием индикаторной бумаги. Для анализа изображения показаны в двух проекциях:

- вид сверху – отображает распределение полюсов по окружности, показывает смещение, ослабление или исчезновение магнитных полюсов;
- вид сбоку – позволяет оценить однородность поля по высоте магнита, выявить возможное ослабление у торцов.



*Рис. 3.* Магниты, не подверженные разрушениям: вид



*Рис. 4.* Магниты, не подверженные разрушениям: вид





Рис. 5. Магнит с трещиной: вид сверху

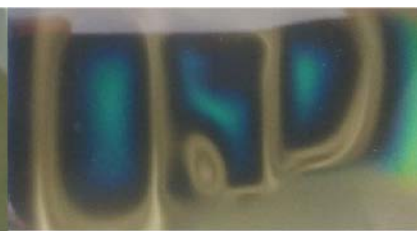


Рис. 6. Магнит с трещиной: вид сбоку

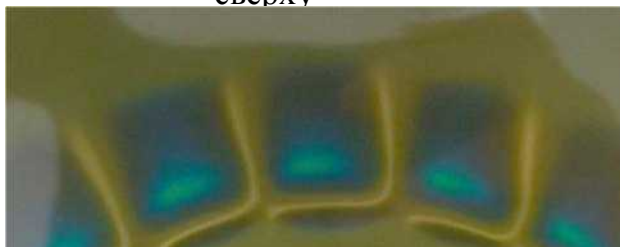


Рис. 7. Магниты, подверженные термическому воздействию: вид сверху

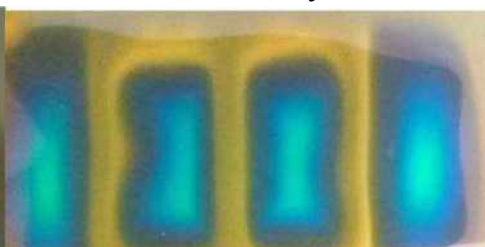


Рис. 8. Магниты, подверженные термическому воздействию: вид сбоку

На рисунке 9 показана шкала соответствия цвета индикаторной бумаги диапазонам магнитной индукции (Гаусс).

	COLOR	GAUSS
	Orange	50-100G
	Yellow	100-150G
	Light Green	150-250G
	Green	250-300G
	Dark Green	300-500G
	Blue	600-800G
	Dark Blue	900-1000G

Рис. 9. Шкала соответствия цветов магнитной индукции

Визуализация магнитного поля ротора с использованием индикаторной бумаги позволила наглядно подтвердить различие между неповреждёнными и деградировавшими участками магнитной системы.

На неповреждённых магнитах наблюдаются равномерные, чётко очерченные участки сине-зеленого цвета, разделённые светлыми промежутками, соответствующими межполюсным зазорам. Цветовая насыщенность и форма полюсов одинаковы, что указывает на равномерное распределение магнитной индукции и отсутствие локальных дефектов.

В зонах термического воздействия наблюдается снижение контраста и частичная размытость рисунка: границы между магнитами становятся менее выраженными, а интенсивность окраски уменьшается. В отдельных случаях отмечаются светло-зеленые области, что указывает на частичную демагнитизацию и неоднородность поля вследствие перегрева.

Магнит с трещиной характеризуется нарушением непрерывности рисунка:

в зоне дефекта виден разрыв, а соседние области отличаются по цвету: видны оттенки светло-зеленого, желтого и оранжевого цветов. Такое искажение формы магнитного поля отражает локальное изменение направления вектора намагниченности, что подтверждает механическую деградацию материала.

На границах зон нагрева контраст постепенно снижается. Эти участки можно рассматривать как переходные, то есть магнитная структура здесь уже частично нарушена, но основное направление намагничивания сохраняется.

### Результаты замеров магнитной индукции гауссметром

Для подтверждения выводов, полученных по результатам визуализации магнитного поля с использованием индикаторной бумаги, был применён метод прямого измерения магнитной индукции. Измерения выполнялись в трёх характерных точках полюса магнитопровода, по центру и по краям, что позволило оценить равномерность распределения магнитного поля по высоте. Результаты приведены в таблице 1.

*Таблица 1*

#### Результаты замеров магнитной индукции

№ магнита	Состояние магнита	Верхний край магнита В, мТл	Середина магнита В, мТл	Нижний край магнита В, мТл
1	Терм. воздействие	193	243	296
2	Терм. воздействие	31	-91	-286
3	Терм. воздействие + трещина	-7	246	23
4	Край терм. воздействия	-268	-283	-282
5	Нормальное	278	294	292
6	Нормальное	-274	-285	-282
7	Нормальное	286	285	312
8	Край терм. воздействия	-284	-299	-272
9	Край терм. воздействия	298	294	269
10	Терм. воздействие	-267	-286	-248
11	Терм. воздействие	259	252	296
12	Терм. воздействие	-272	-207	-245
13	Терм. воздействие	170	291	288
14	Край терм. воздействия	-289	-299	-293
15	Край терм. воздействия	308	306	307
16	Нормальное	-293	-302	-299
17	Нормальное	294	303	293
18	Нормальное	-294	-308	-252
19	Край терм. воздействия	293	307	253
20	Край терм. воздействия	34	-305	-312

Результаты измерения магнитной индукции в трёх сечениях каждого полюса магнитопровода (верхняя, средняя и нижняя часть) позволили выявить существенные различия между неповреждёнными и повреждёнными зонами магнитопровода ротора.

Для неповреждённых магнитов (№ 5-7, 16-18) значения индукции сохраняются стабильными по высоте – порядка  $\pm (280-310 \text{ мТл})$ , при этом распределение полюсов имеет чёткую симметрию, что соответствует нормальному состоянию магнитной системы и равномерному намагничиванию по толщине.

Полюса с комбинированным механико-термическим воздействием (№ 3) демонстрирует выраженную неравномерность поля: амплитуда изменяется от -7 до +246 мТл, а направление вектора индукции в верхней и нижней частях различается по знаку. Это указывает на ослабление поля в зоне трещины.

Полюса, подвергшиеся термическому воздействию (№ 1-2, 10-13), характеризуются снижением средней индукции  $\pm(200-250 \text{ мТл})$  и значительной неоднородностью распределения по высоте. В отдельных случаях (например, № 2) наблюдается инверсия полярности на верхней поверхности, что свидетельствует о частичной демагнитизации или изменении направления остаточного поля вследствие перегрева свыше  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Полюса, расположенные на границе зоны нагрева (№ 4, 8, 9, 14, 15, 19, 20), сохраняют близкие к норме значения индукции, но проявляют лёгкий перекося амплитуды между верхом и низом, что может указывать на температурный градиент и частичное ослабление намагниченности у поверхности.

Таким образом, по совокупности измерений видно, что термические повреждения вызывают постепенное снижение и неравномерность магнитной индукции, тогда как наличие трещин приводит к локальному искажению направления магнитного потока и резкому изменению полярности на отдельных участках.

Проведённое исследование показало, что механические и термические воздействия существенно влияют на магнитное состояние ротора электрической машины. Визуализация с использованием индикаторной бумаги позволила выявить ослабленные и искажённые участки магнитного рисунка, а прямые измерения гауссметром подтвердили снижение магнитной индукции в этих зонах по сравнению с неповреждёнными. Установлено, что трещины вызывают локальные разрывы магнитного потока и изменение направления вектора намагниченности, тогда как термические перегрузки приводят к постепенному ослаблению поля по толщине магнита.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-29-00675 «Разработка фундаментальных научных основ высокоэффективного электромеханического преобразователя энергии с повышенными удельными характеристиками и элементов гибридной силовой установки».*

### Библиографический список

1. Pietrzak P. Demagnetization fault diagnosis of permanent magnet synchronous motors based on stator current signal processing and machine learning algorithms / P. Pietrzak, M. Wolkiewicz // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, № 4. – P. 1757. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s23041757>. (дата обращения: 06.11.2025).
2. Yu B. SAB-YOLOv5: An Improved YOLOv5 Model for Permanent Magnetic Ferrite Magnet Rotor Detection / B. Yu [и др.] // *Mathematics*. – 2024. – Vol. 12, № 7. – P. 957. – DOI: <https://doi.org/10.3390/math12070957>. (дата обращения: 06.11.2025).
3. Abdolmaleki M. Unraveling Magnet Structural Defects in Permanent Magnet Synchronous Machines-Harmonic Diagnosis and Performance Signatures / M. Abdolmaleki, P. Asef, C. Vagg // *Magnetism*. – 2024. – Vol. 4, № 4. – P. 348–367. – DOI: <https://doi.org/10.3390/magnetism4040022>. (дата обращения: 06.11.2025).

© Хамзин Ф.С., Ибатулина Г.Р., Татауров А.И., 2025

**А.Э. ТИМЕРБАЕВА, А.А. КОВРИГИНА**

*stusha\_ed@mail.ru*

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О.В. МЕЛЬНИЧУК

***Уфимский университет науки и технологий***

**Методика обеспечения робастности компараторов в условиях аддитивных помех**

*Аннотация:* в статье рассматривается фундаментальная проблема нарушения стабильности логических состояний в электронных схемах сравнения под влиянием аддитивных шумов. Проводится анализ неэффективности тривиальных методов фильтрации. Предлагается и теоретически обосновывается схмотехническое решение, основанное на введении искусственного гистерезиса. Данный подход, реализуемый через регенеративную цепь, обеспечивает формирование двух разнесенных по уровню порогов коммутации, что является ключом к созданию надежных и предсказуемых цифро-аналоговых интерфейсов.

*Ключевые слова:* пороговый детектор, триггер Шмитта, гистерезис, регенеративная связь, помехозащищенность, паразитная модуляция, компаратор, стабильность состояния, операционный усилитель.

Любая система, взаимодействующая с реальным миром, сталкивается с необходимостью интерпретировать аналоговые сигналы - непрерывно меняющиеся физические величины. Ключевой операцией в этом процессе является сравнение: превышает ли текущее значение сигнала некий установленный порог? Устройства, выполняющие эту бинарную классификацию, называются компараторами (от англ. compare - сравнивать), или детекторами пороговых значений [1]. Их корректная работа является основой для функционирования аналого-цифровых преобразователей и систем автоматизации. Компаратор можно реализовать на операционном усилителе (ОУ), работающем без отрицательной обратной связи (рис. 1, 2) [3].

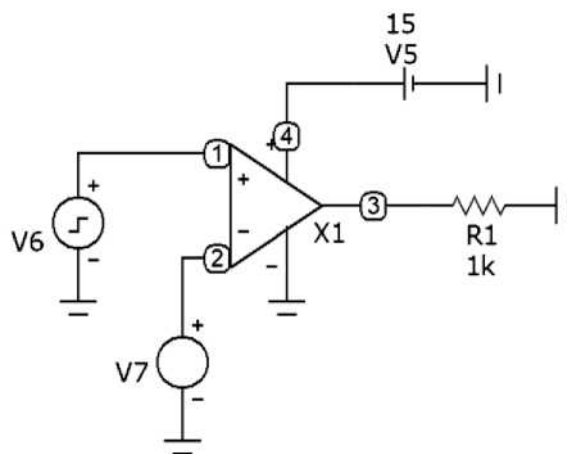


Рис. 1. Детектор пороговых значений на базе ОУ

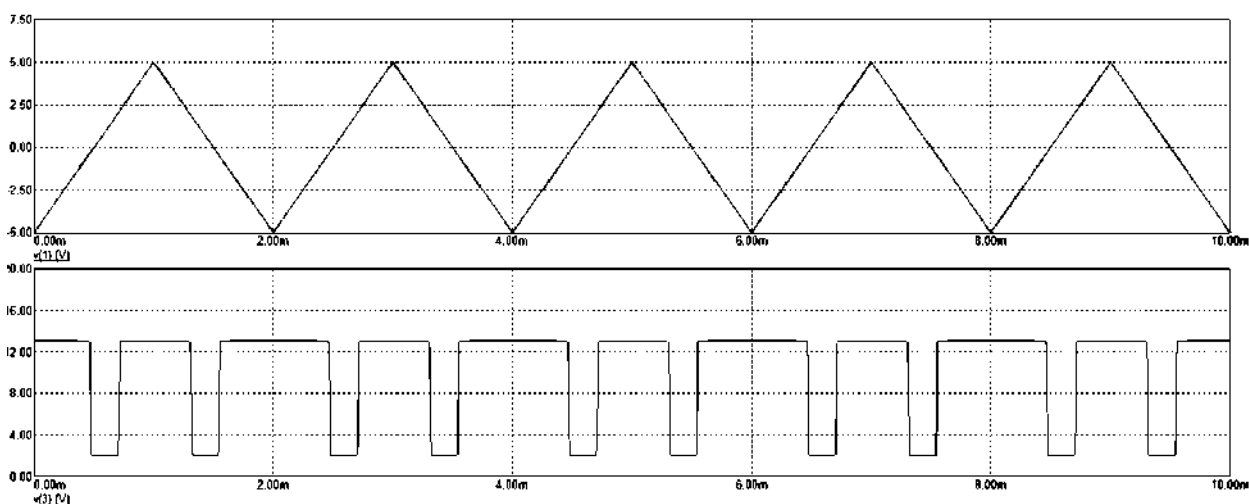


Рис. 2. Динамика выходного сигнала при идеализированном входном воздействии

В идеальной модели такой пороговый детектор работает безупречно. Однако в реальности любой сигнал несет в себе шумовую компоненту (рис. 3). Эти случайные, малоамплитудные флуктуации, накладываясь на основной сигнал, создают серьезную проблему в тот момент, когда уровень сигнала приближается к пороговому значению. Из-за шума фактическое напряжение на входе детектора начинает хаотично «плясать» вокруг пороговой линии [4].

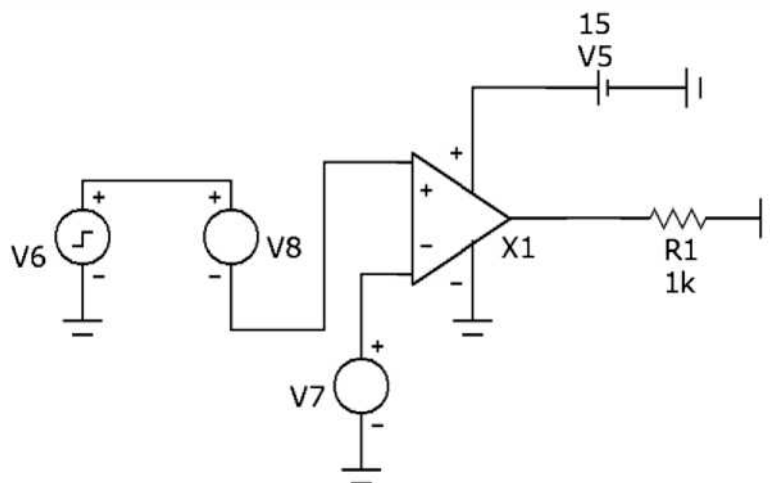


Рис. 3. Добавление шумовой компоненты на входной сигнал с целью моделирования неидеальных условий

Это приводит к явлению, известному как дребезг [4], или паразитная импульсная модуляция. Вместо одного четкого и однозначного перехода из состояния «0» в «1», на выходе схемы генерируется непредсказуемая последовательность коротких импульсов. Для любой цифровой логики, которая должна обработать этот сигнал, такая ситуация является критической и ведет к неминуемым сбоям (рис. 4).

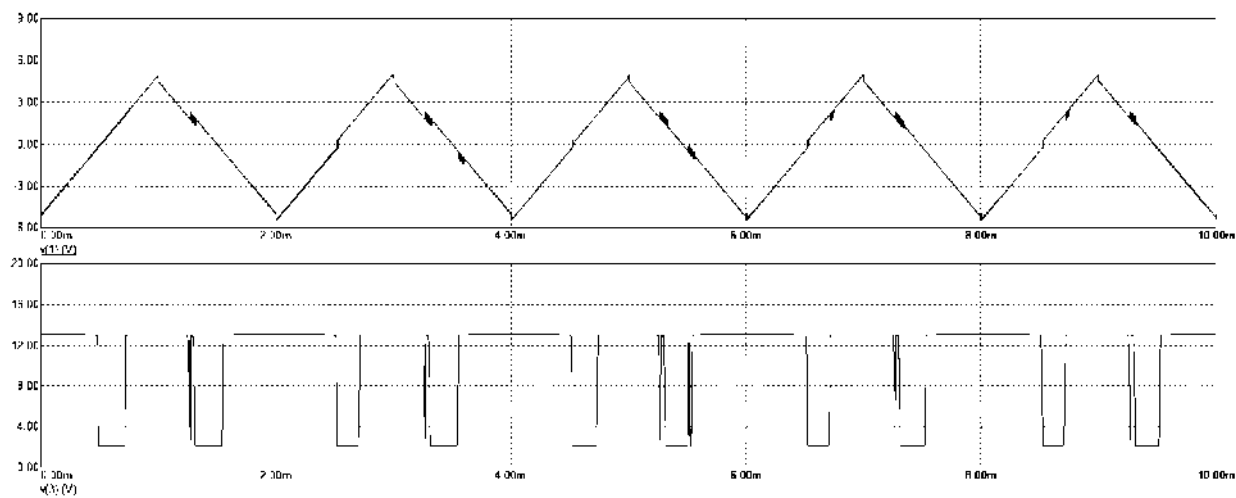


Рис. 4. Динамика выходного сигнала при зашумленном входном воздействии

Очевидным решением кажется попытка «очистить» сигнал от шума перед его подачей на детектор. Для этого часто используют пассивные низкочастотные фильтры, например, простую RC-цепочку. Однако такой подход является грубым компромиссом. Фильтр, ослабляя шум, неизбежно искажает и сам сигнал: он замедляет скорость его нарастания и спада, внося инерционность в реакцию системы. Это не только снижает общее быстродействие, но и может усугубить проблему, так как сигнал дольше находится в уязвимой зоне вблизи порога.

Другой подход - программная обработка - перекладывает задачу на плечи

микроконтроллера. Алгоритм может анализировать сигнал в течение некоторого времени, игнорируя краткосрочные изменения. Это действенный, но ресурсоемкий метод, который к тому же вносит искусственную задержку в принятие решения.

Наиболее правильный и надежный путь - сделать саму схему детектора невосприимчивой к помехам определенной амплитуды. Эта задача решается путем введения гистерезиса - свойства системы, при котором ее реакция на входное воздействие зависит от предыдущего состояния [4]. В контексте порогового устройства это означает создание двух различных порогов срабатывания: верхнего и нижнего.

Верхний порог ( $U_{пв}$ ) - это уровень, который должен быть превышен для перехода из низкого состояния в высокое, а нижний порог ( $U_{пн}$ ) - уровень, ниже которого должен опуститься сигнал для возврата в низкое состояние. Этот эффект достигается введением в схему положительной (регенеративной) обратной связи. Часть выходного напряжения подается обратно на вход, модифицируя точку срабатывания. Такая схема известна как триггер Шмитта (рис. 5) [3].

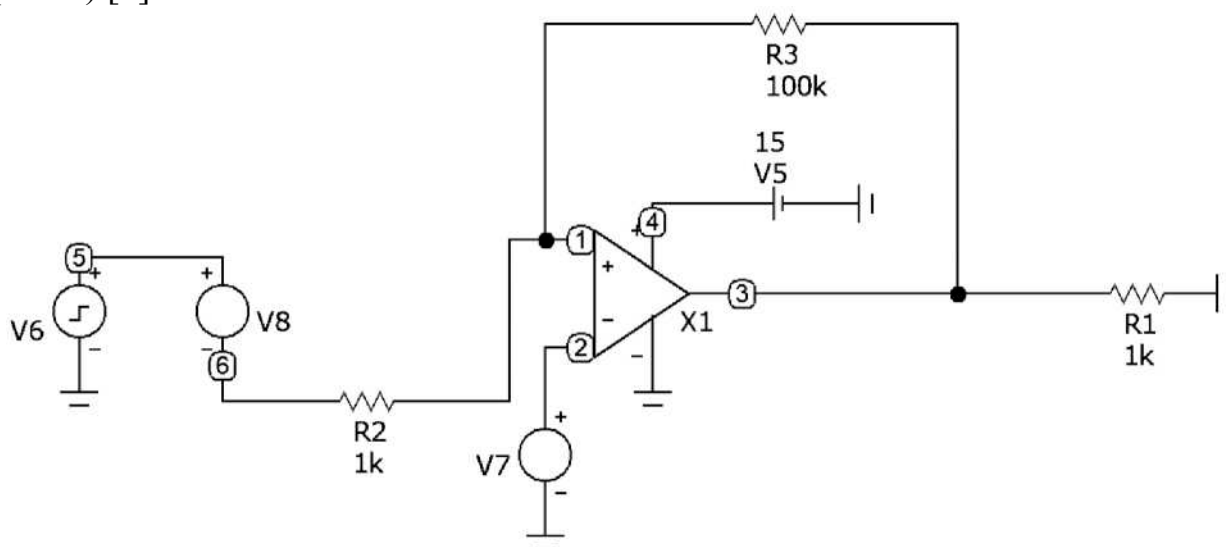


Рис. 5. Триггер Шмитта

Механика процесса такова: когда выход находится в низком состоянии, обратная связь «мешает» входному сигналу, заставляя его подняться до более высокого уровня  $U_{пв}$  для переключения. Но как только переключение произошло, и выход стал высоким, та же обратная связь начинает «помогать» входному сигналу, и для обратного переключения ему теперь нужно опуститься до значительно низкого уровня  $U_{пн}$  [3]. Разница между  $U_{пв}$  и  $U_{пн}$  формирует «мертвую зону», или петлю гистерезиса, ширина которой зависит от номиналов резисторов, в данном случае - от  $R_2$  и  $R_3$  (см. рис. 5). Например, при увеличении сопротивления резистора  $R_3$  и уменьшении  $R_2$  чувствительность к помехам повышается, а ширина петли гистерезиса уменьшается [2]. Следовательно, любые шумовые колебания, амплитуда которых меньше ширины петли



гистерезиса, больше не могут вызвать ложных переключений. Система приобретает абсолютную стабильность и предсказуемость, реагируя только на целенаправленные и значимые изменения входного сигнала (рис. 6).

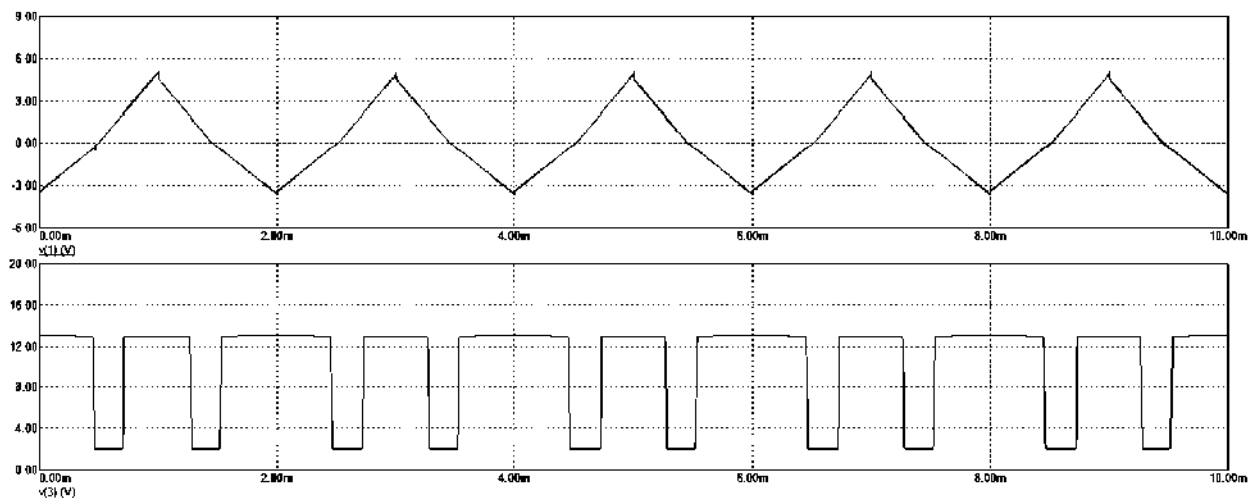


Рис. 6. Временные диаграммы входного и выходного напряжений, демонстрирующие отсутствие дребезга

Эта устойчивость подтверждает, что введение гистерезиса не просто улучшает схему, а фундаментально меняет ее реакцию на зашумленный сигнал, решая проблему на уровне самой архитектуры устройства. Подобное архитектурное решение оказывается особенно значимым, если учесть ограниченность других подходов. В отличие от стандартных схем сравнения, изначально уязвимых к шумам, и простых методов фильтрации, чьи недостатки очевидны, формирование гистерезисной характеристики с помощью регенеративной обратной связи представляет собой наиболее эффективный аппаратный метод обеспечения помехозащищенности.

Именно поэтому триггер Шмитта, как реализация этого принципа, гарантирует высокую надежность и четкость срабатывания, устраняя саму причину возникновения паразитной модуляции на выходе, что и делает данный подход основополагающим при проектировании высококачественных электронных систем.

### Библиографический список

1. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. - Москва: Додэка-XXI, 2005. - 528 с. (дата обращения: 03.11.2025).
2. Нечаев, И. А. Конструкции на логических элементах цифровых микросхем / И. А. Нечаев. - Москва: Радио и связь, 1992. - 120 с. - (Массовая радиобиблиотека; вып. 1172). (дата обращения: 03.11.2025).
3. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство / У. Титце, К. Шенк; пер. с нем. - Москва: ДМК Пресс, 2008. - 942 с. (дата обращения: 03.11.2025).

4. Хоровиц, П. Искусство схемотехники: в 3 т. Т. 1 / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва: Мир, 1993. - 413 с. (дата обращения: 03.11.2025).

© Тимербаева А.Э., Ковригина А.А., 2025

**Р.И. ФАРХУТДИНОВ, Д.И. ЩЕПИН**

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

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

***Уфимский университет науки и технологий***

### **Кибербезопасность в Smart Grid: угрозы и меры защиты**

*Аннотация:* в статье проводится систематизированный обзор современных исследований в области кибербезопасности интеллектуальных распределительных сетей (Smart Grid). На основе анализа семи ключевых публикаций классифицируются основные угрозы в рамках модели CIA-триады - конфиденциальность, целостность и доступность. Подробно рассматриваются такие атаки, как инъекция ложных данных (FDIA), отказ в обслуживании (DoS/DDoS) и социальная инженерия. Обобщены современные стратегии защиты: от традиционных (криптография, сегментация сети) до перспективных - машинное обучение, блокчейн и 5G. Подчеркивается, что устойчивая киберзащита Smart Grid возможна только при синтезе технических, организационных и нормативных мер. Работа адресована студентам и исследователям, изучающим безопасность киберфизических энергосистем. *Ключевые слова:* Smart Grid; кибербезопасность; ложные данные; FDIA; машинное обучение; блокчейн; 5G; CIA-триада; IDPS.

Эволюция энергетических сетей от пассивных радиальных структур к интеллектуальным (Smart Grid) обусловлена необходимостью интеграции распределённой генерации, повышения энергоэффективности и развития двустороннего взаимодействия с потребителем. Ключевыми драйверами трансформации выступают внедрение интеллектуальных счётчиков (AMI), рост доли возобновляемых источников и масштабирование электромобильности. Однако цифровая основа Smart Grid превращает энергосистему в уязвимую киберфизическую структуру [1, 2, 4]. Как отмечают авторы современных исследований, именно кибербезопасность сегодня становится главным барьером на пути широкого внедрения Smart Grid: компрометация даже одного элемента способна спровоцировать каскадные отключения с масштабными социально-экономическими последствиями [1, 2, 4].

Smart Grid охватывает шесть взаимосвязанных доменов: генерация, передача, распределение, потребитель, поставщик услуг и рынки [4]. Их взаимодействие осуществляется через многоуровневую коммуникационную инфраструктуру, что создаёт обширную атакуемую поверхность. Особенно уязвимы интерфейсы между распределёнными устройствами (например, счётчиками) и центрами управления, где искажение информации может привести к критическим ошибкам в принятии решений [1, 4]. Для анализа угроз наиболее продуктивна модель CIA-триады [1, 2, 4].

Нарушение конфиденциальности связано с несанкционированным доступом к чувствительным сведениям: профилям потребления, персональным данным и информации о подключённых приборах [1, 2, 3]. Основные векторы атак - перехват трафика, анализ сетевой активности и фишинг. Утечка таких данных не только нарушает приватность, но и позволяет злоумышленнику формировать поведенческие модели, используемые для поддельных счетов или имитации легитимных команд [2, 4]. Даже агрегированные данные могут раскрывать личные привычки, например, время отсутствия в жилище, что создаёт угрозу физической безопасности [2].

Нарушение целостности направлено на искажение или подмену данных. Ключевой пример - атака с инъекцией ложных данных (FDIA), при которой подделываются показания сенсоров или команды SCADA/DMS [1, 2, 4]. Это может привести к ошибочному расчёту состояния сети, отключению исправного оборудования и даже к масштабным авариям. Другие формы включают replay-атаки, подделку GPS-синхронизации для PMU и манипуляции с показаниями счётчиков, что напрямую ведёт к коммерческим потерям [3, 4]. Искажение данных PMU, в частности, способно вызвать ложное срабатывание релейной защиты [4].

Нарушение доступности реализуется через DoS/DDoS-атаки, создание радиопомех, переполнение буферов и истощение вычислительных ресурсов [1, 2, 4]. Такие действия парализуют критически важные функции: автоматическое восстановление питания (FLISR), управление распределённой генерацией (DERMS) или системы учёта (AMI), что напрямую угрожает надёжности электроснабжения.

История подтверждает серьёзность этих угроз. Атака на энергосистему Украины в 2015 году с использованием вредоносного ПО BlackEnergy привела к отключению света у более чем 200 тысяч человек [1, 3, 4]. Глобальная атака NotPetya в 2017 году, изначально направленная на украинское бухгалтерское ПО, нанесла ущерб в миллиарды долларов по всему миру [1, 3].

Значительную угрозу представляет человеческий фактор. Исследования показывают, что более 98,5 % пользователей игнорируют запросы разрешений от сторонних приложений, а свыше 93 % принимают условия использования в течение минуты [1]. Недостаточная подготовка персонала и использование слабых паролей создают дополнительные векторы проникновения. Не менее опасны уязвимости в цепочке поставок: аппаратные закладки или небезопасное ПО в компонентах от вендоров могут стать «тройным конём» для всей сети [3, 5].

Эффективная защита Smart Grid требует реализации концепции «глубокоэшелонированной обороны», объединяющей три группы мер.

#### 1. Технические меры.

Криптография (AES, RSA, ECC, TLS/SSL, IPsec) и лёгкие (lightweight) решения для ресурсограниченных устройств составляют основу защиты [2, 5]. Перспективным направлением считается квантово-устойчивая криптография [4].

Машинное обучение (SVM, iForest, нейросети) позволяет в реальном

времени выявлять скрытые атаки, такие как FDIA, особенно в случаях, где традиционные методы неэффективны [2, 5]. Алгоритм iForest, например, способен обнаруживать аномалии без размеченных данных [2].

Блокчейн устраняет проблему централизации, обеспечивая неизменяемость транзакций и прозрачность в P2P-торговле энергией и микросетях [2, 3, 5, 6].

5G-сети с их сверхнизкой задержкой и поддержкой массового подключения устройств могут стать основой для задач, требующих мгновенного реагирования [2, 3].

Системы IDPS, сегментация сети и регулярное обновление ПО являются базовыми, но критически важными элементами защиты [3, 5].

## 2. Организационные меры.

Многофакторная аутентификация (MFA) значительно снижает риски компрометации учётных данных [1, 3].

Обучение персонала по вопросам кибергигиены и распознавания фишинга - ключ к нейтрализации самого уязвимого звена - человека [1, 3, 5].

Оценка безопасности поставщиков через пентесты и включение требований по безопасности в контракты [3, 5].

Физическая защита оборудования от несанкционированного доступа [3].

## 3. Нормативная база.

Соблюдение стандартов IEC 62351, NIST IR 7628 и GDPR обеспечивает единый уровень защиты на всех этапах жизненного цикла системы [3, 5].

Проведённый анализ показывает, что универсального технического решения не существует. Эффективная защита возможна лишь через синергию передовых технологий (машинное обучение, блокчейн, 5G), фундаментальных мер (криптография, сегментация) и человекоориентированных практик (обучение, MFA). Реальные инциденты, такие как атаки на Украину и NotPetya, служат ярким напоминанием о цене пренебрежения кибербезопасностью. Будущее Smart Grid - за комплексной, многоуровневой и адаптивной стратегией. Инвестиции в кибербезопасность сегодня - это вклад в надёжность, устойчивость и национальную безопасность энергетической инфраструктуры завтра.

## Библиографический список

1. Tufail S., Parvez I., Batool S., Sarwat A. A Survey on Cybersecurity Challenges, Detection, and Mitigation Techniques for the Smart Grid // Energies. - 2021. - Vol. 14, № 18. - P. 5894. (дата обращения 02.11.2025)
2. Mohammadi F. Emerging challenges in smart grid cybersecurity enhancement: A review // Energies. - 2021. - Vol. 14, № 5. - P. 1380. (дата обращения 02.11.2025)
3. Jha R. K. Cybersecurity and confidentiality in smart grid for enhancing sustainability and reliability // Recent Research Reviews Journal. - 2023. - Vol. 2, № 2. - P. 215–241. (дата обращения 02.11.2025)
4. Alomari M. A., Al-Andoli M. N., Ghaleb M., Thabit R., Alkawsy G., Alsayaydeh J. A. J., Gaid A. S. A. Security of Smart Grid: Cybersecurity Issues, Potential

Cyberattacks, Major Incidents, and Future Directions // *Energies*. - 2025. - Vol. 18, № 1. - P. 141. (дата обращения 02.11.2025)

5. Dehghani M., Ghiasi M., Niknam T., Kavousi-Fard A., Shasadeghi M., Ghadimi N., Taghizadeh-Hesary F. Blockchain-Based Securing of Data Exchange in a Power Transmission System Considering Congestion Management and Social Welfare // *Sustainability*. - 2021. - Vol. 13, № 2. - P. 90. (дата обращения 02.11.2025)
6. Liang J., Wang Y., Gao H., Li Y., Wang C. Hosting Capacity of Distribution Networks // *Energies*. - 2020. - Vol. 13, № 12. - P. 3125. (дата обращения 02.11.2025)
7. Zhang Y., Gatsis N. Distributed Control for Smart Distribution Grids // *IEEE Transactions on Smart Grid*. - 2021. - Vol. 12, № 3. - P. 2234–2247. (дата обращения 02.11.2025)

© Фархутдинов Р.И., Щепин Д.И., 2025

**Р.Р. ШАВАЛЕЕВ**

*ShavaleevRR@uust.ru*

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

*Уфимский университет науки и технологий*

## **Оптимизация массогабаритных показателей авиационных электрических машин с использованием перспективных материалов и технологий**

*Аннотация:* статья посвящена актуальным проблемам современных авиационных электрических машин (ЭМ), связанным с массогабаритными показателями (МГП), и перспективам их оптимизации за счет применения новых материалов и технологий.

*Ключевые слова:* Массогабаритные показатели, перспективные материалы, аддитивные технологии, редкоземельные металлы, компьютерное моделирование.

Современные авиационные ЭМ, как правило, основаны на традиционных материалах (например, электротехническая сталь, медные обмотки). Несмотря на достижения в технологии производства и проектирования, МГП этих ЭМ все еще остаются существенным препятствием для их широкого применения. Проблемы включают:

1. Высокую массу стальных сердечников. Сталь имеет высокую плотность, что приводит к значительной массе ротора и статора.
2. Высокую массу и объем медных обмоток. Медь, хотя и обладает отличной электропроводностью, имеет высокую плотность, тем самым увеличивая массу изделия.
3. Ограниченную прочность и жесткость конструкционных материалов. Это ограничивает возможность создания компактных и высоконагруженных ЭМ.
4. Сложности в охлаждении мощных ЭМ. Высокие тепловые потери требуют эффективных систем охлаждения, увеличивающих габариты и массу.
5. Недостаточная устойчивость к высоким температурам. Высокие температуры, возникающие при работе ЭМ, влияют на срок службы материалов и требуют разработки новых теплостойких материалов.

### **Перспективные материалы для оптимизации МГП**

В поиске решения обозначенных проблем активно исследуются и применяются перспективные материалы:

1. Легкие металлы и сплавы: Алюминий AlSi1MgMn, титан Ti6Al4V, магниевые сплавы AM50, AZ91D, WE43, QE22 и композиты на их основе

предлагают значительное снижение массы без потери прочности. Использование вышеперечисленных материалов позволяет достичь уменьшение массы электрических машин от 44% до 77%;

2. Композитные материалы: Углеродные волокна, арамидные волокна и другие композиты обладают высокой прочностью, жесткостью и низкой плотностью, что позволяет создавать более компактные и легкие конструкции статоров и роторов. Использование вышеперечисленных технологий позволяет достичь уменьшение массы электрических машин от 77% до 82%;

3. Новые магнитные материалы: Материалы на основе редкоземельных металлов (например, NdFeB), а также перспективные ферромагнитные композиты с более высокими характеристиками магнитной индукции и меньшей массой;

4. Высокопроводящие материалы: Материалы на основе графена, углеродных нанотрубок и других наноструктурированных материалов предлагают возможность снижения массы обмоток при сохранении высокой электропроводности;

5. Теплопроводящие материалы: Композиционные материалы и наноструктурированные материалы, обеспечивающие более эффективное рассеивание тепла, способствуют уменьшению размеров систем охлаждения.

### **Инновационные технологии проектирования и производства**

Сочетание новых материалов с инновационными технологиями проектирования и производства открывает новые горизонты:

1. 3D-печать: Возможность создания сложных геометрических форм статоров и роторов с высокой точностью и минимальными затратами материала;

2. Микроэлектромеханические системы (MEMS): Развитие MEMS может привести к созданию компактных и мощных ЭМ;

3. Новые методы охлаждения: Разработка микроканальных систем охлаждения и использования нанофлюидов;

4. Оптимизация магнитного поля: Применение методов численного моделирования для оптимизации формы магнитных полюсов и снижения потерь в материале;

5. Новые методы изготовления обмоток: Применение высокопроводящих материалов и технологий нанотехнологий.

### **Моделирование и анализ МГП авиационных ЭМ**

При разработке и оптимизации электрических машин (ЭМ) важную роль играет оценка влияния новых материалов и технологических решений на массогабаритные показатели. Для этого широко применяются различные методы компьютерного моделирования и аналитические подходы, позволяющие провести детальные исследования конструктивных изменений и материалов перед реализацией реальных образцов.



## **Компьютерное моделирование**

Типичные методы компьютерного моделирования:

### **1. Метод конечных элементов (FEM)**

Один из наиболее распространенных инструментов моделирования. Позволяет анализировать магнитные поля, тепловые режимы, механические напряжения и деформации, возникающие в электрической машине. Посредством трехмерного анализа определяются оптимальные геометрические формы, материалы и способы охлаждения двигателя, минимизируя массу и габариты устройства.

### **2. Многопараметрическое оптимальное проектирование**

Этот подход основан на автоматизации поиска оптимального сочетания конструктивных параметров и материалов для достижения заданных технических требований (например, мощности, КПД, массы, габаритов). Реализуется посредством алгоритмов глобальной оптимизации, позволяющих минимизировать количество итераций и ускорить процесс разработки.

### **3. Моделирование электромагнитных процессов**

Электрические машины представляют собой сложную систему взаимодействия электрического тока, магнитных полей и механических усилий. Численное моделирование позволяет проанализировать взаимное влияние обмоток, магнитопроводящих частей, подшипников и других деталей. Современные симуляторы способны учитывать потери энергии, распределять нагрузку равномерно и находить оптимальную конструкцию ротора и статора.

### **4. Тепловое моделирование**

Тепловой режим является одним из ключевых аспектов функционирования электродвигателей, поскольку перегрев снижает ресурс и производительность. Термодинамика исследует распространение тепла внутри двигателя, определяет допустимые пределы нагрева отдельных узлов и пути улучшения теплоотвода.

### **5. Механика разрушения и усталость материалов**

Новые материалы часто обладают уникальными свойствами, такими как высокая прочность и низкая плотность. Однако важно понимать степень устойчивости к разрушению и циклическим нагрузкам. Моделирование разрушения и предельных состояний позволяет выбрать оптимальный материал для конкретной конструкции и обеспечить долгий срок службы изделия.

## **Аналитические методы**

Помимо компьютерного моделирования, используются разнообразные аналитические методы, обеспечивающие оценку влияния нововведений на массовые и габаритные характеристики двигателей.

Основные аналитические подходы:

### **1. Теория подобия и размерности**

Помогает сравнивать электрические машины различного масштаба и

размера. Использование критериев подобия (таких как число Рейнольдса, Фруда, Маха) позволяет экстраполировать полученные экспериментальные данные на большие масштабы и разрабатывать рекомендации по снижению массы и размеров новой техники.

## **2. Расчёт потерь энергии**

Рассчитываются тепловые потери в проводниках, сердечнике и воздушном зазоре. Чем меньше мощность рассеяния, тем эффективнее работает двигатель, что ведёт к уменьшению требуемой охлаждающей инфраструктуры и общего веса конструкции.

## **3. Оптимизация материалов**

Материалы оказывают непосредственное влияние на вес и размеры двигателя. Применение лёгких сплавов алюминия и магния, композитов, высокопрочных сталей позволяет существенно снизить общую массу конструкции, сохраняя необходимые прочностные и электромагнитные характеристики.

## **4. Минимизация объёма активных зон**

Путём тщательного подбора геометрии обмоток, толщины стенок корпуса и расположения воздушных каналов достигается уменьшение объёма активной части двигателя, что положительно сказывается на массе и размерах всего агрегата.

## **5. Асимптотический анализ**

Важно для понимания фундаментальных ограничений и выявления тенденций развития конструкции двигателя. Так, можно показать, что снижение плотности энергии в батарее неизбежно ведёт к увеличению её габаритов, а увеличение коэффициента полезного действия обратно пропорционально уменьшает необходимость массивных охлаждающих систем.

Применение методов компьютерного моделирования и аналитических исследований позволяет инженерам своевременно оценивать влияние инновационных материалов и технологий на массогабаритные показатели электрических машин. Современное программное обеспечение и инструменты обеспечивают возможность быстрой и точной проверки гипотез, сокращая сроки вывода изделий на рынок и улучшая качество продукции.

# **Примеры применения перспективных материалов и технологий**

## **1. Электрические машины для электротолкателей**

Современная авиация активно внедряет автоматизацию управления различными механизмами, такими как приводы дверей, люков, шасси и тормозных систем. Значительное внимание уделяется созданию компактных, мощных и надежных электротолкателей.

## **2. Перспективные композитные материалы**

Одним из важнейших прорывов стала разработка лёгкого композитного материала на основе полимеров и углерода. Российские учёные из Казанского национального исследовательского технологического университета представили

исследование, опубликованное в международном журнале «Composite Structures». Они показали, что использование армированных углеволокнами пластиков снижает массу толкателя на 30%, при сохранении высоких прочностных характеристик.

Кроме того, статья авторов из Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» продемонстрировала преимущества применения графенов, наносимых тонким слоем на поверхность катушек индуктивности. Это позволяет заметно снижать сопротивление обмоток и повышать их общий КПД.

### 3. Электрические машины для систем электропитания

Повышение уровня электрификации самолётных систем сопровождается необходимостью разработки маломощных и ультракомпактных электродвигателей для подачи питания бортовым устройствам.

### 4. Инновационные изоляционные материалы

Исследования учёных из Томского политехнического университета, опубликованные в российском журнале «Известия высших учебных заведений. Энергетика», демонстрируют перспективы применения новых электроизоляционных материалов на основе фторопластов и полиимида. Их уникальная химическая структура обеспечивает высокую термоустойчивость и диэлектрическую прочность, что способствует развитию лёгких и компактных электродвигателей.

Ещё один пример успеха в данном направлении представлен командой исследователей из Научно-исследовательского института авиационных материалов. В своей работе, опубликованной в Journal of Power Sources (Scopus), они доказали эффективность специально разработанного гибридного композита на основе керамики и жидкокристаллических полимеров. Данный материал обладает повышенной устойчивостью к воздействию влаги и кислот, что гарантирует длительный срок службы даже в жёстких климатических условиях.

### 5. Развитие генераторов;

Разработка высокопроизводительных и стабильных генераторов остаётся важнейшей задачей в авиации. Генераторами оснащаются практически все современные самолёты, они служат основным источником питания бортового оборудования.

### 6. Высокотемпературная сверхпроводимость.

Одной из новейших разработок стали системы с применением высокотемпературных сверхпроводников (HTS). Специалисты Центра перспективных технологий и материалов совместно с коллегами из МАИ опубликовали статью в International Journal of Applied Electromagnetics in Materials (Scopus), демонстрирующую значительный потенциал HTS-материалов для авиационных генераторов. За счёт уникальных свойств сверхпроводимости удастся существенно повысить удельные показатели мощности при одновременном снижении массы установки.

Другим примером служит работа коллектива учёных из Университета ИТМО, опубликованная в Russian Engineering Research (BAK). Они разработали принципиально новую конструкцию ротора с использованием многослойных

магнитов, изготовленных из NdFeB-сплавов последнего поколения. Данная конструкция позволила повысить стабильность генерируемого сигнала и продлить межремонтный период работы генераторов.

### **Перспективы развития**

Несмотря на достигнутый прогресс, дальнейшие шаги требуют продолжения исследований и внедрения новаторских идей. Некоторые из перспективных направлений включают:

1. Искусственный интеллект и глубокое обучение: Алгоритмы машинного обучения будут использоваться для точного определения оптимальной архитектуры электродвигателей и систем электропитания, исходя из конкретных режимов полета и особенностей эксплуатации.

2. Интеграция с энергосберегающими технологиями: Более тесная интеграция авиационных двигателей с возобновляемыми источниками энергии и умными сетевыми технологиями обеспечит эффективное перераспределение энергии, увеличивая автономность полётов и снижая потребление ресурсов.

3. Дальнейшая роботизация производственных процессов: Автоматизация производства и контроль качества позволят выпускать продукцию быстрее и точнее, сводя к минимуму дефекты и потребность в резервных запасах.

4. Ориентация на экологически чистые материалы: Продолжается активный поиск биоразлагаемых и легко перерабатываемых материалов, совместимых с требованиями авиационной индустрии.

### **Библиографический список**

1. Иванов И.И., Петров П.П. Исследование возможностей легких металлических сплавов в авиастроении // Авиация и космонавтика. 2023. №3. С. 45-58. (дата обращения 02.11.2025).
2. Сергеев Е.А., Смирнов Н.Н. Графеновые покрытия для повышения эффективности авиационных электрических машин // Вестник науки и образования. 2024. Т. 12. №2. С. 123-131. (дата обращения 02.11.2025).
3. Новикова Л.Л., Степанов В.В. Новые типы изоляции для авиационных электродвигателей // Вопросы электроэнергетики. 2023. №2. С. 78-85. (дата обращения 02.11.2025).

© Шавалеев Р.Р., 2025

**Э.Д. ШАРАФУТДИНОВ, Р.С. ШИПУЛЬ**

*lsushka@internet.ru*

Науч. руковод. – ассистент кафедры ЭМ М.В. ИВАНОВ

***Уфимский университет науки и технологий***

### **Конструктивные методы повышения отказоустойчивости синхронной машины с постоянными магнитами при коротком замыкании**

*Аннотация:* в статье рассматриваются конструктивные методы повышения отказоустойчивости синхронных машин с постоянными магнитами при возникновении короткого замыкания. Эти методы направлены на ограничение тока короткого замыкания и на защиту постоянных магнитов от размагничивания. Представлен сравнительный анализ рассмотренных конструктивных решений.

*Ключевые слова:* синхронная машина с постоянными магнитами, отказоустойчивость, короткое замыкание, размагничивание, конструктивные методы.

#### **1. Введение**

Синхронная машина с постоянными магнитами (СМПМ) доминируют на рынке тяговых и вспомогательных машин благодаря высокому крутящему моменту и их высокому КПД при полной нагрузке. Поскольку потребность в высокой мощности возрастает, электрические машины будут подвергаться более высоким механическим, термическим и электрическим нагрузкам, что может повысить вероятность их отказов [6].

Межвитковое короткое замыкание обмотки является одной из важных причин неисправностей в СМПМ. Короткое замыкание в обмотках статора СМПМ приводит к резкому увеличению тока, эти токи могут превышать номинальное значение более чем в 14 раз. Они вызывают чрезмерное увеличение температуры в обмотке якоря, что ведет к нарушению изоляции всей обмотки, и к генерации недопустимых электромагнитных сил [3]. Это может вызвать серьезное повреждение машины, инвертора и других элементов системы привода, а также полную потерю работоспособности.

Вследствие этого разработка конструктивных мер является важной задачей при создании приводных систем для транспортных, авиационных и промышленных приложений. Конструктивные методы повышения отказоустойчивости направлены на ограничение последствий короткого замыкания на этапе проектирования, в отличие от программных методов управления.

## **2. Природа и последствия короткого замыкания в СМПМ**

Короткое замыкание в СМПМ обычно классифицируется как:

1. Межвитковое короткое замыкание: Возникает из-за пробоя изоляции между витками;

2. Фазное (клеммное) короткое замыкание: Короткое замыкание на клеммах фазы или трех фаз.

Основными последствиями при коротком замыкании являются:

1. Необратимое размагничивание постоянных магнитов. Ток короткого замыкания статора создает мощное противоположно направленное магнитное поле, которое может сместить рабочую точку Кюри магнита за пределы линейного участка кривой размагничивания [2]. Размагничивание вызывает разность плотности потока и изменяет индуктивность СДПМ [1]. Это приводит к безвозвратной потере магнитных свойств у постоянных магнитов, расположенных на роторе СМПМ;

2. Термическое разрушение обмотки статора. Короткое замыкание приводит к увеличению крутящего момента у СМПМ типа генератора, и как следствие еще больше увеличивает перегрев машины. Аварийные токи короткого замыкания могут в десятки раз превышать номинальные, вызывая интенсивный нагрев обмотки за короткое время, что приводит к повреждению изоляции [1, 3];

3. Пожарная опасность. Превышение допустимых температур в подшипниковых узлах и обмотках электродвигателя приводит к термическому разложению смазки и изоляционных материалов с выделением горючих газов, что при наличии кислорода и источника возгорания создает высокий риск возникновения пожара.

## **3. Конструктивные методы повышения отказоустойчивости**

Конструктивные методы повышения отказоустойчивости направлены на две цели: ограничение тока короткого замыкания и физическое разделение фаз, катушек для локализации неисправности.

### **3.1. Ограничение тока короткого замыкания**

Ограничение тока короткого замыкания достигается за счет увеличения индуктивности обмотки: Ток короткого замыкания обратно пропорционален индуктивности. Это можно сделать с помощью:

1. Изменения геометрии статора: Использование полузакрытых или закрытых пазов увеличивает индуктивность по сравнению с открытыми пазами, что способствует ограничению тока короткого замыкания. Это происходит благодаря созданию более узкого прохода для магнитного потока в области паза [4];

2. Изменения длины воздушного зазора: Увеличение воздушного зазора

снижает поток постоянных магнитов и увеличивает индуктивность, но это снижает момент машины, требуя тщательного компромисса.

### **3.2. Повышение отказоустойчивости**

Методы, обеспечивающие возможность продолжения работы после короткого замыкания:

1. Многофазные конструкции: Применение машин с числом фаз более трех (например, 5-фазные) обеспечивает бесперебойную работу в условиях обрыва одной из фаз [5]. При коротком замыкании одной фазы машина продолжает работать на оставшихся, с меньшим моментом и большими пульсациями;

2. Концентрированная (зубцовая) обмотка: в отличие от распределенных обмоток, концентрированные обмотки обеспечивают минимальную связь между фазами (низкая взаимная индуктивность), что значительно снижает ток короткого замыкания и минимизирует воздействие неисправной фазы на исправные.

### **3.3. Защита постоянных магнитов**

Конструктивные меры, направленные на предотвращение термического и магнитного повреждения постоянных магнитов. Эти методы гарантируют, что даже при возникновении короткого замыкания машина сохранит свою работоспособность после устранения аварии или не выйдет из строя из-за необратимого повреждения магнитов.

1. Сегментирование постоянных магнитов: Разделение постоянных магнитов на мелкие, электрически изолированные части. Это не ограничивает ток короткого замыкания в обмотке, но снижает вихревые токи в самих постоянных магнитах, уменьшая их нагрев, который критически важен для предотвращения размагничивания. Сегментирование постоянных магнитов осуществляется в направлении, перпендикулярном направлению вихревых токов;

2. Выбор материала для постоянного магнита: Использование постоянных магнитов с высокой коэрцитивной силой, более устойчивых к размагничивающему полю при повышенной температуре. Например, магниты из SmCo 2, 17 или Альнико вместо преваичного NdFeB [2].

## **4. Сравнительный анализ**

В этом разделе приведена таблица 1 «Сравнительная характеристика конструктивных методов», которая представляет сравнительный анализ рассмотренных конструктивных методов. Анализ систематизирует

преимущества и недостатки каждого метода, а также где может область применения.

*Таблица 1*

Сравнительная характеристика конструктивных методов

Метод	Преимущества	Недостатки	Область применения
Многофазная конструкция	Повышение отказоустойчивости	Усложнение силовой электроники. Увеличение габаритов	Используется, когда есть необходимость продолжения работы после отказа одной фазы
Концентрическая обмотка	Низкая взаимная индуктивность минимизирует ток короткого замыкания и локализует неисправность в одной фазе	Повышенный уровень гармоник магнитодвижущей силы, что приводит к дополнительным потерям на вихревые токи в магнитах и, следовательно, к их дополнительному нагреву	Используется, когда основной целью является локализация неисправности и минимизация последствий короткого замыкания на остальные фазы
Увеличение воздушного зазора	Ограничение тока короткого замыкания	Уменьшение удельной мощности	Используется, как компромиссное решение в СМПИМ, где нужно ограничить ток короткого замыкания за счет мощности



Метод	Преимущества	Недостатки	Область применения
Сегментация постоянных магнитов	Снижение циркуляции вихревых токов и нагрев магнитов	Увеличение сложности изготовления и стоимости сборки ротора	Используется, когда нужно снизить вихревые токи и вероятность термического
Выбор материала для постоянного магнита	Повышает допустимую рабочую температуру в случае выбора SmCo, т. е. магнита с высокой коэрцитивной силой	Высокая стоимость. Магниты, обладающие высокой коэрцитивной силой, значительно дороже стандартных	Используется, когда СМППМ эксплуатируется в условиях высоких температур

### Заключение

Таким образом, применение конструктивных методов создает основу, которая позволяет СМППМ либо выдержать воздействие тока короткого замыкания, либо обеспечивает необходимое время для проведения диагностики и ликвидации аварии.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что выбор конкретного конструктивного решения должен быть компромиссным и зависеть от требуемых приоритетов отказоустойчивости:

1. Для продолжения работы после отказа фазы предпочтительны многофазные конструкции;
2. Если главная цель является локализация неисправности и минимизация тока короткого замыкания, следует применять концентрическую обмотку;
3. Для защиты магнитов от действия короткого замыкания целесообразно использовать сегментацию постоянных магнитов или магниты с высокой коэрцитивной силой;
4. Увеличение воздушного зазора может использоваться как компромиссное решение для ограничения тока короткого замыкания за счет удельной мощности.

Дальнейшее развитие темы предполагает практические исследования для формирования конкретных рекомендаций по выбору методов.

## Библиографический список

1. Саксонов, Е. А. Обзор методов обнаружения неисправностей синхронного электродвигателя с постоянными магнитами / Е. А. Саксонов, С. Е. Симонов, М. Г. Городищев // Инженерный вестник Дона. - 2023. - № 4. - URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8339](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8339) (дата обращения: 05.11.2025).
2. Шевченко, А. Ф. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие / А. Ф. Шевченко, А. Г. Приступ. - Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2016. - 64 с.
3. Гулов, И. В. Исследования межвиткового замыкания синхронного генератора с постоянными магнитами / И. В. Гулов, Д. А. Кожевников // Вестник Казанского государственного энергетического университета. - 2017. - № 3 (35). - С. 13-19. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-mezhvitkovogo-zamykaniya-sinhronnogo-generatora-s-postoyannymi-magnitami/viewer> (дата обращения: 06.11.2025).
4. Li, C. Effect of Slot Opening Width on the Air-Gap Magnetic Field of a Direct Drive Permanent Magnet Motor / C. Li, S. Liu, D. Fan // Applied Sciences. - 2019. - Vol. 9, Iss. 21. - P. 4649. - DOI: 10.3390/app9214649. - URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/21/4649> (дата обращения: 07.11.2025).
5. Ahmed, I. A. Short-circuit fault-tolerant control for five-phase fault-tolerant permanent magnet motors with trapezoidal back-EMF / I. A. Ahmed, M. Abdel Majeed, A. Sathyan // White Rose Research Online. - 2021. - URL: [https://www.researchgate.net/publication/355432001\\_Short-Circuit\\_Fault-Tolerant\\_Control\\_for\\_Five-Phase\\_Fault-Tolerant\\_Permanent\\_Magnet\\_Motors\\_with\\_Trapezoidal\\_Back-EMF](https://www.researchgate.net/publication/355432001_Short-Circuit_Fault-Tolerant_Control_for_Five-Phase_Fault-Tolerant_Permanent_Magnet_Motors_with_Trapezoidal_Back-EMF) (дата обращения: 09.11.2025).
6. Nandi, S. Inter-turn Short Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Machines: An Extended Review and Comprehensive Analysis / S. Nandi // ResearchGate. - 2018. - URL: [https://www.researchgate.net/publication/323530560\\_Inter-turn\\_Short\\_Circuit\\_Faults\\_in\\_Permanent\\_Magnet\\_Synchronous\\_Machines\\_An\\_Extended\\_Review\\_and\\_Comprehensive\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/323530560_Inter-turn_Short_Circuit_Faults_in_Permanent_Magnet_Synchronous_Machines_An_Extended_Review_and_Comprehensive_Analysis) (дата обращения: 08.11.2025).

© Шарафутдинов Э.Д., Шипуль Р.С., 2025

**Р.С. ШИПУЛЬ, Э.Д. ШАРАФУТДИНОВ**

*rom4000ka@gmail.com, lsushka@internet.ru*

Науч. руковод. – ассистент кафедры ЭМ М.В. ИВАНОВ

*Уфимский университет науки и технологий*

### **Методы повышения коэффициента заполнения паза проводом**

*Аннотация:* статья посвящена анализу современных методов повышения коэффициента заполнения паза проводом, в работе подробно рассматриваются назначение коэффициента заполнения, факторы, влияющие на его заполнение, основные методы повышения коэффициента, их преимущества и недостатки, области применения.

*Ключевые слова:* коэффициент заполнения паза проводом, эффективность электродвигателя, технология уплотнения обмотки, электрические машины, плотность тока, обмоточный провод.

Обмотка является неотъемлемой частью электрической машины (ЭМ). От ее конструкции, качества изготовления, применяемых технологий изготовления и материалов зависит качество и эффективность работы электрической машины. В свою очередь проектирование и изготовление обмотки зависит от типа электрической машины, ее мощности, напряжения и ряда других факторов. При этом важной характеристикой обмотки является плотность ее укладки, оцениваемая коэффициентом заполнения паза проводниками (далее  $k_z$ ).

Коэффициент заполнения паза показывает плотность размещения проводников в пазе, то есть как много места занято обмоткой по отношению к площади паза. Повышение коэффициента заполнения увеличивает сечение и токовую нагрузку, повышает выходной крутящий момент и удельную мощность двигателя, однако увеличивает и активное сопротивление меди, что влечет потери на ней мощности, и из-за большего протекания тока увеличивается нагрев обмотки.

Достичь идеального коэффициента заполнения, равного 1 (или 100%), невозможно, это связано с наличием изоляции у провода и паза, необходимостью зазоров для укладки проводников, наличия микропустот в связи с формой провода, необходимостью пространства для циркуляции воздуха.

Для различных способов заполнения существуют рекомендуемые значения коэффициента. При ручной укладке  $k_z = 0,5 - 0,56$ , а при механизированной укладке  $k_z = 0,4 - 0,45$  [2].

При этом слишком большие значения коэффициента заполнения паза накладывают свои ограничения: увеличение сложности и стоимости

изготовления, вероятность повредить обмотку и её изоляцию за счет сильного механического воздействия, уменьшение вентиляционного пространства паза, что приводит к затруднению отвода тепла от обмоток.

### Основные факторы, влияющие на коэффициент заполнения паза

Чтобы понять, как можно изменять коэффициент заполнения паза, нужно рассмотреть основные факторы, от которых он зависит. Во-первых,  $k_z$  зависит непосредственно от самого паза, его формы, размеров и изоляции. Относительно формы в основном используются следующие типы: трапециевидальный паз, наиболее распространенный, удобный для укладки предварительно сжатых катушек, однако с неэффективной клиновидной частью паза; овальный паз, обладающий меньшим значением  $k_z$  из-за скругленных стенок, однако более низким уровнем шума и лучшей работа на высоких скоростях; прямоугольный паз идеально подходит для укладки проводников прямоугольного сечения, позволяя достичь максимальных значений  $k_z$ , однако недостатком являются острые углы, где возникает повышенная напряженность электрического поля, из-за чего приходится усиливать пазовую изоляцию. Отношения размеров можно отметить, что узкий и высокий паз способствует лучшему уплотнению проводов, что повышает  $k_z$ , а в широком и низком пазе больше пустот между проводами, что снижает  $k_z$ , однако значительно улучшает теплоотвод. Пазовая изоляция - неизбежное уменьшение полезной площади паза, она предотвращает пробой между медью и магнитопроводом, изготавливается из электроизоляционного картона (гетинакс), пленок (DMD, Nomex), композиционных материалов.

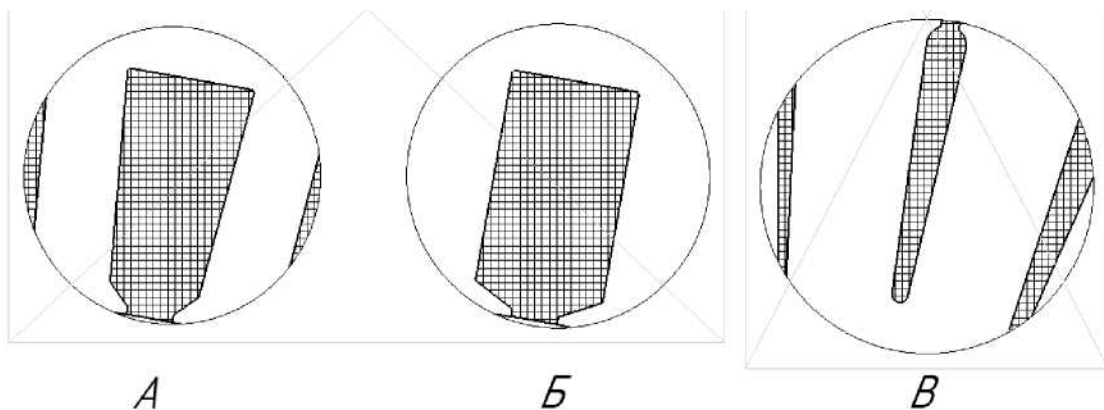
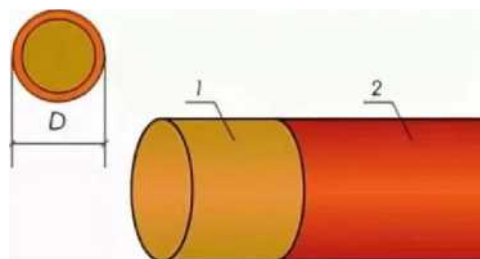


Рис. 1. Основные типы формы пазов электрической машины

Во-вторых,  $k_z$  зависит от самого провода, его формы, размеров и изоляции. Относительно формы выделяют 2 вида провода: с круглым сечением, который более дешевый, гибкий и распространенный, однако при укладке образуются пустоты, понижающие  $k_z$  и с прямоугольным сечением, который идеально подходит для прямоугольного паза, так как проводники

прилегают друг к другу практически без зазоров, что наиболее эффективный повышает  $k_z$ , однако сложен в изготовлении гибких катушек и ведет к повышению вихревых токов за счёт увеличения площади контакта обмотки. Относительно диаметра провода видится следующая тенденция: при использовании одного провода большого диаметра снижается относительная доля изоляции, однако из-за большей жесткости обмотки затрудняется укладка, а из-за большей площади провода увеличиваются потери на вихревые токи; с другой стороны, использование нескольких проводов меньшего диаметра позволяет лучше заполнить сечение паза, однако площадь изоляции будет больше. Относительно изоляции провода выделяют эмалевую изоляцию, которая обладает высокой электрической и механической прочностью при минимальной толщине, что делает их оптимальными для повышения  $k_z$  (пример: ПЭТВ, ПЭЛ), волокнистая изоляция хлопчатобумажная или шелковая оплетка, обеспечивает лучшую стойкость к истиранию, но имеет значительную толщину, что резко снижает  $k_z$  (пример: ПБД, ПСД); комбинированная изоляция обычно состоит из эмали и одного или двух слоев шелковой или лавсановой оплетки, используется если важна механическая прочность, в данном случае для высокого  $k_z$  следует минимизировать толщину волокнистого слоя или отказаться от него, если это позволяет технология укладки (пример: ПЭТВ-2 и др.).



## Эмальпровод ПЭТВ-2

**П- ПРОВОД**

**Э- ЭМАЛИРОВАННЫЙ**

**Т- ТЕПЛОСТОЙКИЙ**

**В - ВЫСОКОПРОЧНЫЙ**

**2-2 СЛОЯ ЭМАЛИ НА ПРОВОДЕ**

*Рис. 2. Пример провода ПЭТВ-2, в котором используется совмещенный тип изоляции*

В-третьих, влияние на коэффициент заполнения паза проводом оказывает способ намотки провода, а именно ручной или автоматизированный. Ручная намотка характерна для ремонта, прототипирования и мелкосерийного производства, она сильно зависит от

квалификации обмотчика, этот метод трудозатратный, медленный и несет в себе риск повреждения изоляции и нестабильности результата. С другой стороны, автоматическая намотка применяется в массовом производстве с помощью ЧПУ станков, которые обеспечивают большую точность и исключают человеческий фактор производства. Провод укладывается с заданным, оптимальным натяжением, что исключает «провисание» и обеспечивает равномерную плотность. Это ключевая технология для стабильного достижения высоких значений  $k_3$  в промышленных масштабах.

### **Основные методы повышения коэффициента заполнения паза проводом**

Условно можно разделить методы повышения  $k_3$  на методы, связанные с конструкцией и материалами и на технологические методы. Вот основные методы, связанные с конструкцией и материалами:

- Применение провода прямоугольного сечения [4]

Прямоугольные проводники плотнее прилегают друг к другу, минимизируя пустоты, неизбежные при укладке круглых проводов. Данный метод позволяет резко увеличить  $k_3$  (до 0,75-0,85 и выше), однако сопровождается более высокой стоимостью, сложностью укладки в пазы сложной формы, повышенными потерями на вихревые токи в массивных проводниках (требуют разбивки на элементарные проводники).



*Рис. 3. Обмоточный провод прямоугольного сечения в пазу статора*

- Оптимизация изоляции [6]

Использование эмалей с высокой электрической прочностью при малой толщине (например, классы нагревостойкости F, H), комбинированная изоляция «эмаль и шелк/ламидан» обеспечивает необходимую

механическую прочность при укладке без чрезмерного увеличения габаритов.

С другой стороны, стоит отметить следующие технологические методы:

- Использование игольчатой намотки [5]

Провод подается в паз через тонкую иглу, которая совершает сложные возвратно-поступательные и вращательные движения, управляемые ЧПУ станком. Данный способ позволяет укладывать провод виток к витку с идеально контролируемым натяжением и исключает человеческий фактор, обеспечивая повторяемость и максимально возможную для круглого провода плотность укладки. Особенно эффективно для пазов сложной формы и зубчатых полюсных обмоток.

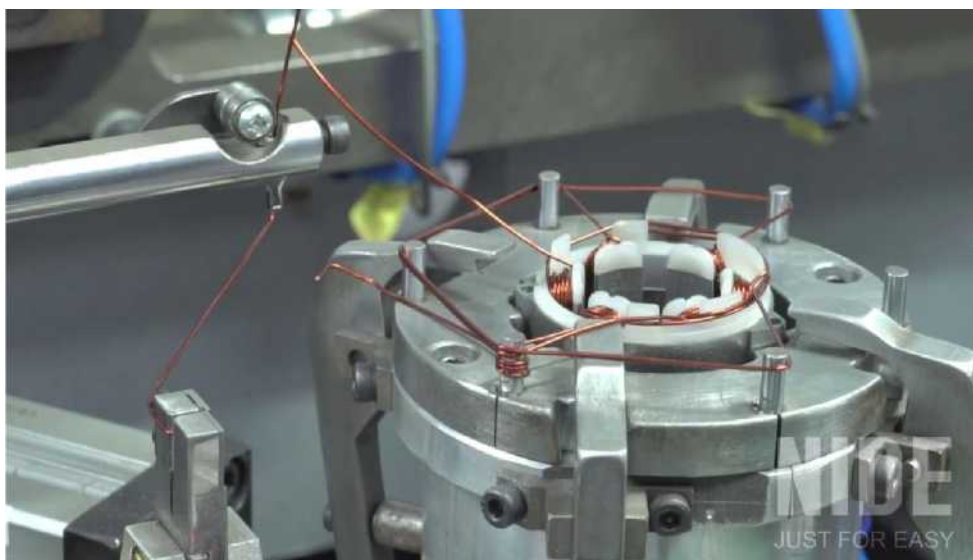


Рис. 4. Процесс игольчатой намотки с помощью ЧПУ

- Прессованная обмотка [1]

Стандартная катушка, намотанная на шаблон, помещается в пресс-форму, геометрия которой в точности повторяет контур паза статора или ротора. Под воздействием высокого механического давления (сотни кгс/см<sup>2</sup>) проводники деформируются и смещаются, заполняя все внутреннее пространство формы. В результате катушка из гибкой превращается в жесткий монолитный «кирпич» заданной формы. Прессовка позволяет радикально уменьшить или полностью устранить воздушные зазоры между витками, которые неизбежно возникают при свободной укладке. Проводники уплотняются, занимая практически весь отведенный для них объем. Из минусов стоит отметить риск повреждения изоляции, в связи с необходимостью контролировать усилие сжатия катушке в оснастке, а также необходимость проектирования и изготовления точных пресс-форм делает метод экономически затратным.

- Вырезание обмотки из бруска по форме паза [5]

Технология позволяет создать обмотку, которая является идеальной негативной копией формы паза. Вместо того чтобы укладывать отдельные



проводники, инженеры создают цельную структуру с вырезки ее из монолитного бруска. Этот подход позволяет полностью устранить пустоты, неизбежные при укладке круглого или даже прямоугольного провода. Проводящий материал заполняет весь доступный объем паза, за вычетом минимальной толщины электрической изоляции. Однако значительно повышается стоимость, сложность процесса и вихревые токи.

- Вакуумно-Импрегнационная Технология [7]

Сердечник с уложенной обмоткой помещается в герметичную камеру. Создается вакуум, удаляющий воздух из всех микропустот. Затем под давлением подается пропиточный лак (компаунд), который заполняет оставшиеся пустоты. Обмотка превращается в единый монолитный блок с идеальным тепловым контактом между витками и с сердечником. Хотя этот метод не увеличивает объем меди, он кардинально улучшает условия, позволяющие этот объем использовать, ведь поскольку теплопередача улучшается в разы, конструктор может позволить себе более высокую плотность тока в обмотке, что эквивалентно увеличению полезного использования паза. Устраняется риск локальных перегревов в оставшихся пустотах.



*Рис. 5. Процесс вакуумной пропитки статора в специальных баках*

В результате анализа методов повышения коэффициента заполнения паза проводом можно сделать следующие выводы:

Прямоугольный провод дает максимальный коэффициент заполнения и высочайшую производительность в серийном производстве, при этом обеспечивает хорошую механическую жесткость, однако требует чрезвычайно высокие капиталовложения в автоматизированные линии,



сложен в процессе и склонен к повышенным потерям на вихревые токи на высоких частотах. Это технология используется в массовом производстве тяговых электродвигателей для электромобилей и других областей, где ключевыми являются мощность, компактность и низкая себестоимость при больших тиражах.

Оптимизация изоляции позволяет увеличить коэффициент заполнения на 5-10% без изменения геометрии паза или провода, это самый простой и дешевый способ повысить  $k_3$ . Современные тонкие эмали и пленочные изоляции паза обладают высокой электрической прочностью и термостойкостью при минимальной толщине, но при этом снижение толщины изоляции может привести к снижению ее механической прочности и устойчивости к истиранию во время укладки, и поэтому метод требует очень точного контроля качества проводника и процесса намотки. Используется повсеместно - от маломощных двигателей бытовой техники до крупных промышленных машин. Является базовым, обязательным к применению методом.

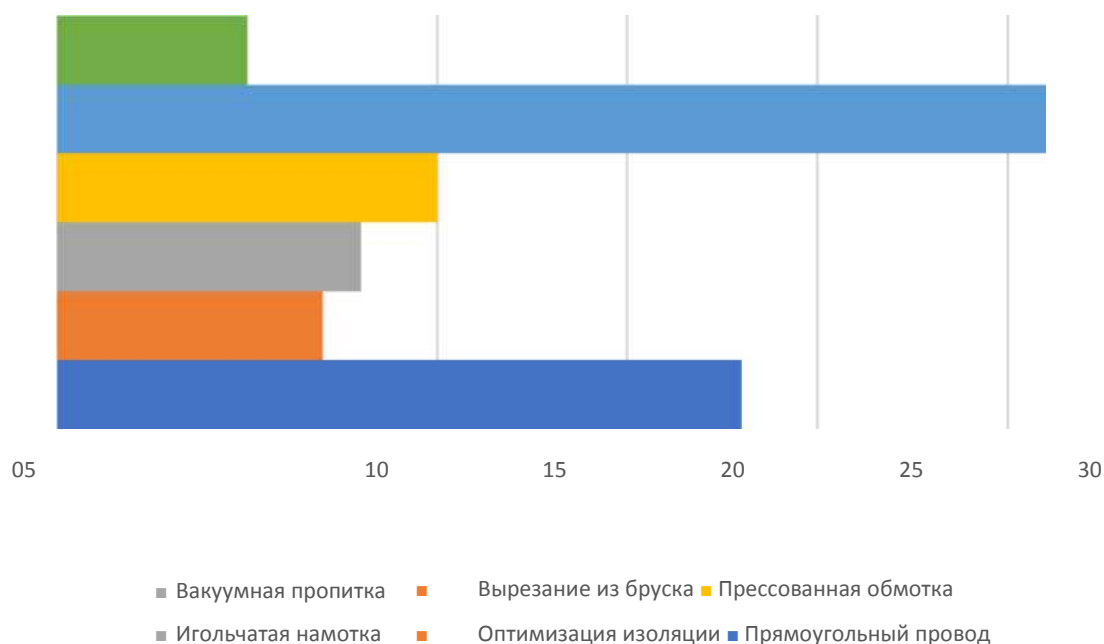
Игольчатая намотка обеспечивает высокую точность и повторяемость, позволяет достигать близкого к теоретическому максимуму коэффициента заполнения для круглого провода, но также требует значительных инвестиций в ЧПУ-оборудование. Скорость намотки выше, чем у ручного метода, но ниже, чем у полностью автоматизированных альтернатив. Основная ниша - мелкосерийное и среднесерийное производство малых и средних статоров для серводвигателей, авиационной и робототехнической промышленности, где важна гибкость и точность, отлично подходит для сложных форм пазов.

Прессованная обмотка позволяет достичь очень высокого и, что важно, стабильного коэффициента заполнения за счет создания жесткой монолитной катушки, а также значительно улучшает механическую стойкость и теплоотвод, однако метод требует изготовления точной и дорогой пресс-формы для каждого типа паза и существует риск повреждения изоляции при превышении давления. Широко распространена в средне- и крупносерийном производстве статоров для высокооборотных двигателей, двигателей для компрессоров и насосов - там, где важна надежность и стойкость к вибрациям.

Вырезание обмотки из бруска по форме паза позволяет достичь предельного коэффициента заполнения, так как медь физически заполняет весь объем паза. Открывает возможности для создания интегрированных каналов жидкостного охлаждения внутри проводников и оптимизации их формы для снижения потерь. Но вместе с тем у метода наблюдается чрезвычайно высокая стоимость, длительность производства и сложность обработки, высокие потери на вихревые токи в массивном проводнике. В настоящее время метод используется в основном в исследовательских целях, для создания прототипов двигателей с экстремальными параметрами, в аэрокосмической отрасли и в специализированном высокобюджетном

оборудовании.

Вакуумно-мпрегнационная технология, не увеличивая долю меди, кардинально улучшает теплопередачу, превращая обмотку в цельный блок, что в свою очередь повышает электрическую прочность, механическую стойкость к вибрациям и защиту от влаги и агрессивных сред. Позволяет увеличить токовую нагрузку на 10-15%. Метод требует дорогостоящего оборудования (вакуумные камеры, насосы, емкости для лака) и строгого контроля технологического цикла. Сам процесс пропитки занимает значительное время. Является стандартом для любых ответственных электродвигателей и генераторов: судовых, тяговых, для нефтегазовой отрасли, а также для высокооборотных двигателей, где важна механическая целостность обмотки.



**Рис. 6. Прирост коэффициента заполнения паза проводом для разных методов**

Влияние  $k_3$  значительно. Его изменение отражается на основных характеристиках электрического двигателя. Повышение коэффициента достигается не каким-то конкретным методом, а является системой из нескольких методов. Выбор оптимального решения - это компромисс между стоимостью, технологичностью и требуемыми характеристиками. Современные технологии позволяют сочетать и находить все более новые методы для повышения коэффициента заполнения паза проводом, и возможно развитие в области материалов, изоляции и производства проводов позволят при меньших затратах добиться большей эффективности.

### Библиографический список

1. Султангареев Д. У. Прессованные обмотки электрических машин / Д. У. Султангареев. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80297642> (дата обращения: 09.11.2025).
2. Захаренко А. Б. Способ упорядоченной намотки обмотки статора электрической машины / А. Б. Захаренко, Д. Ю. Носов. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82797078> (дата обращения: 09.11.2025).
3. Бикбова З. М. Влияние коэффициента заполнения паза статора на характеристики электрического двигателя / З. М. Бикбова, М. Л. Лутфуллин. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82637198> (дата обращения: 09.11.2025).
4. Копылов И. П. Справочник по электрическим машинам / И. П. Копылов. - Москва: Энергоатомиздат, 1988. - 456 с. - URL: <https://djvu.online/file/X3UqQ7id5Z0fW?ysclid=mhskxp4rny712455933> (дата обращения: 09.11.2025).

5. Additive manufacture of large structures: robotic or CNC systems? - URL: [https://www.researchgate.net/publication/283548549\\_Additive\\_manufacture\\_of\\_large\\_structures\\_robotic\\_or\\_CNC\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/283548549_Additive_manufacture_of_large_structures_robotic_or_CNC_systems) (дата обращения: 09.11.2025). - Текст: электронный.
6. A Review on Additive Manufacturing Possibilities for Electrical Machines - URL: [https://www.researchgate.net/publication/350544880\\_A\\_Review\\_on\\_Additive\\_Manufacturing\\_Possibilities\\_for\\_Electrical\\_Machines](https://www.researchgate.net/publication/350544880_A_Review_on_Additive_Manufacturing_Possibilities_for_Electrical_Machines) (дата обращения: 09.11.2025). - Текст: электронный.
7. Vacuum Pressure Impregnation Process in Superconducting Coils: Best Practice - URL: [https://www.researchgate.net/publication/254060453\\_Vacuum\\_Pressure\\_Impregnation\\_Process\\_in\\_Superconducting\\_Coils\\_Best\\_Practice](https://www.researchgate.net/publication/254060453_Vacuum_Pressure_Impregnation_Process_in_Superconducting_Coils_Best_Practice) (дата обращения: 09.11.2025). - Текст: электронный.

© Шипуль Р.С., Шарафутдинов Э.Д., 2025

**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***

**Интеллектуальные распределительные сети и их компоненты:  
современное состояние и аналитический обзор**

*Аннотация:* в статье представлен аналитический обзор smart grid, их составных частей и факторов, мешающих их разворачиванию в РФ. Подчеркнуто несоответствие между доступностью технологических решений и их комплексным внедрением, аргументирована потребность в локализации зарубежных наработок посредством реализации тестовых проектов и унификации требований.

*Ключевые слова:* интеллектуальные распределительные сети; автоматизация распределительных сетей; распределённая генерация; цифровая трансформация энергетики; кибербезопасность.

Сегодняшние электрические распределительные сети более не являются статичными звеньями в цепи энергоснабжения, а эволюционируют в сложные, регулируемые комплексы. Данная метаморфоза обусловлена не только растущей значимостью уменьшения углеродного следа, но и возникновением множества новых источников и потребителей энергии малого масштаба, таких как солнечные панели, электрокары и домашние системы аккумулирования энергии. В связи с этим, классическая радиальная схема, нацеленная на однонаправленную транспортировку энергии от крупных генераторов, теряет свою актуальность, уступая место эластичной, приспособляемой инфраструктуре, обладающей способностью к самоуправлению и быстрой адаптации к меняющимся условиям.

Официально, принципы подобной трансформации зафиксированы в стандарте ГОСТ Р 58293-2018, определяющем интеллектуальную сеть как систему, автоматизирующую обработку данных от получения до применения для оптимизации. Однако, в России этот подход внедряется бессистемно, в отличие от ЕС и США, где развитие происходило в рамках масштабных инициатив, в РФ преобладают локальные проекты.

Данная статья имеет целью не простое описание элементов интеллектуальных сетей, а выявление несоответствия между заявленными возможностями и реальностью, а также оценку условий для эффективного применения зарубежного опыта в России.

Проблема кроется не только в устаревшем оборудовании, но и в недостаточной совместимости различных программных продуктов,

предлагаемых разными поставщиками. Отсутствие единой платформы, объединяющей данные от различных источников, препятствует комплексному анализу и принятию обоснованных решений. Интеграция с системами планирования и прогнозирования, такими как DERMS, становится затруднительной без стандартизированного обмена данными.

Для преодоления этих препятствий необходимо сосредоточиться на разработке и внедрении открытых стандартов обмена данными, совместимых с международными нормами, и на создании единой платформы для управления данными интеллектуальной электросети. Это позволит объединить информацию от различных источников, включая устройства учета, датчики, системы управления и прогнозы погоды, для оптимизации генерации, передачи и распределения электроэнергии.

Кроме того, необходимо уделять больше внимания интеграции с распределенной генерацией (DER). Переход к более децентрализованной энергетической системе требует более сложных систем управления и прогнозирования. DERMS играет ключевую роль в интеграции DER, но ее эффективность зависит от доступности точных и своевременных данных.

В конечном счете, успех в построении интеллектуальных электросетей в России зависит от комплексного подхода, включающего модернизацию оборудования, внедрение стандартизированных протоколов обмена данными, создание единой платформы управления данными и интеграцию с распределенной генерацией. Только тогда можно будет в полной мере реализовать потенциал интеллектуальных электросетей для повышения надежности, эффективности и устойчивости энергоснабжения. Аналогично в автоматическом восстановлении электроснабжения. Технология FLISR ускоряет локализацию и устранение повреждений, снизив SAIDI в Сочи на 40%, но ее применение ограничено высокой стоимостью оборудования и необходимостью обновления воздушных линий.

Самые серьезные проблемы наблюдаются в сфере управления децентрализованными источниками энергии. В то время как европейские системы DMS контролируют тысячи DER в режиме реального времени, в России даже простейшая оптимизация напряжения (VVO) реализована лишь в незначительной части сетей (менее 12%). Причина кроется в недостаточном объеме телеметрических данных на нижнем уровне, что отрицательно сказывается на точности управления.

Значительную тревогу вызывает состояние кибербезопасности. 8 из 10 сетевых компаний в Российской Федерации не проводят систематическую проверку на наличие уязвимостей, несмотря на увеличение количества устройств, подключенных к Интернету вещей (IoT). Отсутствие специализированных требований к распределительным сетям в Федеральном законе №187 создает существенный пробел в нормативном регулировании данной области.

## Сравнительный анализ

Показатель	ЕС / США	Россия	Разрыв
Доля автоматизированных фидеров	60-80%	15-20%	×4
Время восстановления (SAIDI)	30-60 мин	2-4 ч	×4-8
Интеграция ВИЭ в сети	До 30% мощности	<5%	×6
Использование данных АМІ для управления	70%	<20%	×3.5

В отличие от передовых стран, где автоматизация охватывает 60-80 % распределительных фидеров, в России этот показатель не превышает 15-20 % [1, 3]. В странах ЕС и США средняя продолжительность перерыва в электроснабжении (SAIDI) колеблется от 30 до 60 минут. В России же на восстановление подачи электроэнергии уходит от 2 до 4 часов, что значительно превышает зарубежные показатели (разница в 4-8 раз). В европейских распределительных сетях доля распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) достигает 25-30 % от суммарной установленной мощности, тогда как в российских сетях этот показатель не превышает 5 %. Кроме того, в зарубежных энергосистемах данные, полученные с интеллектуальных приборов учёта, активно применяются для регулирования потребления и оптимизации режимов работы (более чем в 70 % случаев). В России же использование этих данных ограничено преимущественно учётом электроэнергии (менее 20 %). Эти различия свидетельствуют не о недостатке необходимых технологий, а о недостаточном уровне их комплексного внедрения в общую систему управления.

Основные трудности, с которыми сталкивается Россия, кроются не столько в дефиците конкретных технических инноваций, сколько в нехватке комплексного, упорядоченного подхода к их объединению. Отдельные "интеллектуальные" элементы не смогут образовать полноценную интеллектуальную структуру без унифицированной архитектуры информации и централизованного управления.

Вместе с тем, есть причины для позитивного взгляда в будущее. Прогресс российских разработок в сфере периферийных вычислений и софта для администрирования распределенных сетей (DMS), включая инициативы "Сколково", постепенное внедрение цифровых двойников в экспериментальных проектах, а также увеличение количества образовательных программ в вузах (например, в МЭИ и СПбПУ) с акцентом на интеллектуальных энергетических системах, вселяют уверенность.

Для стимулирования развития ИРС в России предлагается: инициировать национальную программу развития интеллектуальных сетей с конкретными этапами и измеряемыми критериями эффективности; адаптировать международный стандарт IEC 61850 к особенностям российской действительности через разработку соответствующего национального

стандарта; учредить испытательные полигоны для апробации и оптимизации решений в условиях, приближенных к реальным (по примеру европейского проекта EU SmartNet).

Интеллектуальные распределительные сети представляют собой не просто набор технологических средств, а принципиально новую парадигму управления энергоснабжением на локальном уровне. Российский энергетический сектор обладает значительным потенциалом для быстрого прогресса, однако для этого требуется переход от обособленных экспериментальных проектов к общей стратегии, учитывающей как технические, так и организационные аспекты. Только такой подход позволит ИРС стать не просто "цифровым расширением", а эффективным инструментом для устойчивого развития энергетической инфраструктуры.

### **Библиографический список**

1. Литвинов Е. А. Цифровая трансформация распределительных сетей: вызовы и возможности / Е. А. Литвинов [и др.] // Электрические станции. - 2022. - № 5. - С. 2-10.
2. Герасимов А. В. Проблемы внедрения DMS в российских сетях // Энергетик. - 2023. - № 2. - С. 33-38.
3. Стратегия цифровой трансформации до 2030 г. / ПАО «Россети». - 2022. - (дата обращения: 05.11.2025). - Текст: электронный.
4. Королёв А. В. Применение АМІ в распределительных сетях России / А. В. Королёв, А. Н. Ткачёв // Известия вузов. Электромеханика. - 2021. - № 4. - С. 45-51.
5. Сидоров Д. Н. Самовосстанавливающиеся распределительные сети / Д. Н. Сидоров [и др.] // Электротехника. - 2020. - № 7. - С. 12-18.
6. Иванов С. П. Экономическая эффективность ДА в российских условиях // Экономика энергетики. - 2023. - № 1. - С. 22-29.
7. Zhang Y. Distributed Control for Smart Distribution Grids / Y. Zhang, N. Gatsis // IEEE Trans. on Smart Grid. - 2021. - Vol. 12, № 3. - P. 2234-2247.
8. Григорьев А. С. Кибербезопасность ИРС // Безопасность информационных технологий. - 2022. - № 3. - С. 55-63.
9. Liang J. Hosting Capacity of Distribution Networks / J. Liang [et al.] // Energies. - 2020. - Vol. 13, № 12. - Art. 3125.
10. Цифровые решения для энергетики. Отчёт по итогам 2023 г. / Сколково. - 2023. (дата обращения: 05.11.2025). - Текст: электронный.
11. Wang Y. Digital Twins for Smart Distribution Systems / Y. Wang [et al.] // IEEE Access. - 2022. - Vol. 10. - P. 12345-12356.

© Щепин Д.И., Фархутдинов Р.И., 2025



**Д.С. ЯКУНИН**

*danila20232@mail.ru*

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

*Уфимский университет науки и технологий*

### **Перспективные материалы для электродвигателей стратосферных спутников**

*Аннотация:* в статье рассмотрены современные и перспективные материалы для создания электродвигателей стратосферных спутников. Рассмотрены требования к материалам, особенности их эксплуатации в условиях стратосферы, вопросы теплового управления, использование аддитивных технологий и направления дальнейшего развития данной области.

*Ключевые слова:* стратосферные спутники, электродвигатель, наноматериалы, композиты, аддитивные технологии, охлаждение, испытания, HAPS.

Развитие технологий стратосферных спутников, или HAPS (High Altitude Pseudo-Satellites), сопровождается постоянным совершенствованием энергетических систем и конструкционных решений. Электродвигатели, применяемые в этих аппаратах, должны сочетать малую массу, высокую надежность и энергоэффективность при длительной непрерывной работе в условиях крайне низких температур, разреженной атмосферы и интенсивного воздействия ультрафиолетового излучения. Эти факторы накладывают особые требования к выбору материалов и технологии изготовления двигателей.

Материалы для электродвигателей должны обладать высокой прочностью при минимальной плотности, термической стабильностью, низкими потерями на перемагничивание и минимальным электросопротивлением. Кроме того, они обязаны сохранять свои свойства при радиационном воздействии, не подвергаться коррозии и выдерживать циклические термомеханические нагрузки. В связи с этим внимание инженеров сосредоточено на создании новых материалов, которые способны обеспечить долговечность и эффективность работы в стратосферных условиях.

Особое место занимают магнитные материалы, от которых зависит эффективность электромагнитного преобразования энергии. Нанокристаллические и аморфные сплавы на основе Fe-Si-B-Nb-Cu, такие как FINEMET и NANOPERM, обладают высокой магнитной проницаемостью и низкими потерями на вихревые токи, что делает их предпочтительными для применения в сердечниках двигателей. Кобальтовые сплавы Co-Fe-V характеризуются высокой температурной стабильностью, что особенно важно при эксплуатации на высотах до 25 километров, где возможны значительные

колебания температур. Использование таких материалов позволяет существенно снизить массу конструкции при сохранении требуемой мощности и надёжности.

Для обмоток электродвигателей всё большее распространение получают алюминиевые сплавы, модифицированные углеродными нанотрубками или графеном. Эти нанодобавки повышают прочность и термостойкость проводников, при этом практически не снижая электропроводности. Медные сплавы Cu-Zr и Cu-Cr-Ag применяются в узлах с повышенной тепловой нагрузкой. Перспективным направлением являются сверхпроводящие материалы второго поколения на основе REBCO-лент, которые позволяют минимизировать потери на нагрев, хотя их использование пока ограничено сложностью криогенного охлаждения.

Корпус и несущие элементы электродвигателя также требуют особых материалов. Титановые сплавы Ti-6Al-4V широко применяются благодаря их сочетанию прочности, малой плотности и устойчивости к коррозии. Не менее перспективны углерод-углеродные композиты, обладающие высокой жёсткостью при малом весе. Эти материалы не подвержены деформации при низких температурах и могут работать в широком диапазоне нагрузок. Полимерные композиции, армированные углеродными и арамидными волокнами, позволяют дополнительно снизить массу конструкции и повысить устойчивость к вибрационным воздействиям.

Важной задачей при создании электродвигателей для стратосферных аппаратов является эффективное тепловое управление. Из-за отсутствия плотного воздуха традиционное конвекционное охлаждение невозможно, поэтому применяются методы радиационного и теплопроводного отвода тепла. Используются алюминиевые радиаторы с нанопокрытиями, повышающими излучательную способность поверхности, а также тепловые трубки с фазовым переходом. Инновационные композиты на основе графена и углеродных волокон обладают уникальными теплопроводными свойствами и обеспечивают более эффективный теплоотвод по сравнению с металлами.

Современные аддитивные технологии открывают новые возможности при производстве деталей электродвигателей. 3D-печать металлов и композитов позволяет создавать изделия со сложной топологией, в том числе с интегрированными каналами охлаждения и изменяемой структурой плотности. Применение технологий селективного лазерного плавления (SLM) для титановых и алюминиевых сплавов даёт возможность уменьшить массу компонентов на 20-30 %, сохранив их механическую прочность. Градиентные структуры обеспечивают оптимальное сочетание жёсткости и гибкости, что положительно сказывается на надёжности работы двигателя.

Перед внедрением новых материалов проводится комплекс моделирования и испытаний в условиях, приближённых к реальным. Для этого используются климатические камеры и аэродинамические трубы, в которых имитируются низкое давление, радиация и температурные перепады. Численные методы анализа (ANSYS, COMSOL, SolidWorks Simulation) позволяют прогнозировать тепловые и механические нагрузки, а также оптимизировать

конструкцию ещё до изготовления опытного образца. Такие подходы значительно сокращают затраты и повышают точность проектирования.

В перспективе развитие технологий будет направлено на создание метаматериалов с направленной теплопроводностью, способных адаптивно изменять свои свойства при изменении условий окружающей среды. Активно исследуются интеллектуальные материалы, такие как сплавы с эффектом памяти формы (SMA) и пьезоэлектрические композиты, которые могут компенсировать вибрации и температурные деформации в реальном времени. Ожидается, что сочетание нанотехнологий, аддитивного производства и умных материалов приведёт к созданию нового поколения электродвигателей, отличающихся высокой энергоэффективностью, малой массой и рекордной долговечностью.

Таким образом, развитие перспективных материалов для электродвигателей стратосферных спутников представляет собой междисциплинарное направление, объединяющее достижения в области материаловедения, аэрокосмической техники и энергетики. Инновационные решения в этой сфере позволят в ближайшем будущем повысить эффективность и надёжность систем HAPS, обеспечивая устойчивое функционирование спутников нового поколения в экстремальных условиях стратосферы.

### **Библиографический список**

1. Кузнецов Н. Т. Основы нанотехнологии. – М. Бином. Лаборатория знаний, 2014. – 400 с.
2. Воронина Е. Н. Механизмы ядерных реакций при взаимодействии космической радиации с материалами и наноструктурами/ Е. Н. Воронина, Л. И. Галинина, Н. С. Зеленская, В. М. Лебедева, В. Н. Милеев, Л. С. Новиков, В. В. Синолиц, А. В. Спасский. – Известия Российской Академии Наук. Серия физическая, 2009. – 208-212 с.
3. Молодцов Е. В. Некоторые вопросы обеспечения неметаллическими материалами авиационно-космической техники/ Е. В. Молодцов, В. Т. Минаков, В. А. Турченков, М. А. Масенкис. - Материалы и технологии для авиационно космической техники. 2005. – 28-29 с.
4. Хасанов О. Л. Легкий композиционный материал для космической техники/ О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, А. О. Хасанов, М. С. Петюкевич, И. И. Ремизов. 2015. – 6 с.

© Якунин Д.С., 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция 4. Электротехнические комплексы и системы

<i>Агадуллина М.С.</i> Анализ состояния изоляции электрооборудования на основании измерения частичных разрядов.....	3
<i>Байбурин А.Р., Иванов М.В.</i> Магнитные материалы, используемые в синхронных машинах с постоянными магнитами.....	8
<i>Буриков А.С., Габдурахманова К.А.</i> Применение технологий интернета вещей (iot) для мониторинга состояния оборудования трансформаторных подстанций.....	16
<i>Ворфоломеев Д.В., Савиных А.А.</i> Обоснование применения электрической машины с внешним ротором для БПЛА.....	20
<i>Горюхин М.О.</i> Современные тенденции развития электротехнических комплексов в авиационной технике.....	24
<i>Змановская И.В.</i> Современные материалы и принципы отказоустойчивости электрических машин для транспортных применений.....	31
<i>Ибатулина Г.Р.</i> Обеспечение отказоустойчивости СДПМ с использованием секционирования.....	35
<i>Мусин Р.М.</i> Термоэлектрические генераторы: принципы работы и перспективы применения.....	41
<i>Пономарев Г.О.</i> Энергия черной дыры для электротранспорта: вызовы и решения.....	46
<i>Салимханов И.Р.</i> Математические методы оптимизации режимов энергосистем.....	50
<i>Султангареев Д.У., Шайхлисламов А.И.</i> Обзор перспективных решений обмоток электрических машин.....	55
<i>Хамзин Ф.С., Татауров А.И., Ибатулина Г.Р.</i> Исследование локальных повреждений магнитной системы ротора электрической машины методом магнитно-полевого анализа.....	61
<i>Тимербаева А.Э., Ковригина А.А.</i> Методика обеспечения робастности компараторов в условиях аддитивных помех.....	68
<i>Фархутдинов Р.И., Щепин Д.И.</i> Кибербезопасность в Smart Grid: угрозы и меры защиты.....	74
<i>Шавалеев Р.Р.</i> Оптимизация массогабаритных показателей авиационных электрических машин с использованием перспективных материалов и технологий.....	78
<i>Шарафутдинов Э.Д., Иванов М.В., Шипуль Р.С.</i> Конструктивные методы повышения отказоустойчивости синхронной машины с постоянными магнитами при коротком замыкании .....	84
<i>Шипуль Р.С., Шарафутдинов Э.Д., Иванов М.В.,</i> Методы повышения коэффициента заполнения паза проводом.....	90
<i>Щепин Д.И., Фархутдинов Р.И.</i> Интеллектуальные распределительные сети и их компоненты: современное состояние и аналитический обзор.....	100
<i>Якунин Д.С.</i> Перспективные материалы для электродвигателей стратосферных спутников.....	104

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*

***XIX Всероссийской молодёжной научной конференции  
(г. Уфа, 24 – 28 ноября 2025 г.)***

*Электронное издание сетевого доступа*

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

*Статьи публикуются в авторской редакции*

Подписано к использованию 29.12.2025 г.  
Гарнитура «Times New Roman». Объем 5,62 Мб.  
Заказ 405.

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

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