

## **Содержание**

*Электротехника, 2025, №12, стр. 2-6*

### **Анализ теплового состояния аддитивной обмотки из сплава $AlSi_{10}Mg$ для синхронной машины с постоянными магнитами**

**ШАЙХЛИСЛАМОВ А.И., ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ОХОТНИКОВ М.В., ЖАРКОВ Е.О., ГОРЮХИН М.О.**

Представлены результаты теплового анализа обмотки синхронной машины с постоянными магнитами. Рассмотрена обмотка, изготовленная аддитивным способом из алюминиевого сплава  $AlSi_{10}Mg$  с интегрированными каналами жидкостного охлаждения. Выполнено электромагнитное моделирование для расчета потерь в программном обеспечении AnsysMaxwell и последующий тепловой анализ в программном обеспечении AnsysFluent. Результаты теплового анализа подтверждают эффективность проектируемой обмотки, демонстрируя возможность удержания температур в допустимых пределах, что дает возможность для создания легких и мощных электрических машин нового поколения.

**Ключевые слова:** электрическая машина, жидкостное охлаждение, обмотка статора, аддитивные технологии, тепловое моделирование.

The results of the thermal analysis of the winding of a synchronous machine with permanent magnets are presented. A winding made by an additive method from  $AlSi_{10}Mg$  aluminum alloy with integrated liquid cooling channels is considered. Electromagnetic modeling was performed to calculate losses in the Ansys Maxwell software and subsequent thermal analysis in the AnsysFluent software. The results of the thermal analysis confirm the effectiveness of the designed winding, demonstrating the possibility of keeping temperatures within acceptable limits, which makes it possible to create lightweight and powerful electric machines of a new generation.

**Key words:** electric machine, liquid cooling, stator winding, additive technologies, thermal modeling.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 7-10*

### **Математическое моделирование озонатора сотовой структуры**

МАКСУДОВ Д.В.

Рассмотрена конструкция озono-каталитического устройства сотовой структуры, для которой разработана математическая модель газоразрядного процесса и предложена методика итерационного расчета, позволяющего определить распределение напряженности электрического поля в воздушных промежутках устройства и определить напряжение пробоя этих промежутков.

**Ключевые слова:** барьерный разряд, газоразрядные процессы, синтез озона, озонатор, сотовая структура.

The design of an ozone-catalytic device of a cellular structure is considered, for which a mathematical model of the gas-discharge process has been developed and an iterative calculation technique has been proposed that makes it possible to determine the distribution of electric field strength in the air gaps of the device and determine the breakdown voltage of these gaps.

**Key words:** barrier discharge, gas discharge processes, ozone synthesis, ozonator, cellular structure.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 11-16*

### **Проектирование беспазовой электрической машины с магнитопроводом из аморфного магнитомягкого материала**

УРАЗБАХТИН Р. Р., ИСМАГИЛОВ Ф. Р., ИВАНОВ М.В., СУЛТАНГАРЕЕВ Д.У.

Рассмотрены проектирование беспазовой электрической машины с магнитопроводом из аморфного магнитомягкого материала и особенности таких магнитопроводов.

Рассмотрены особенности конструкции беспазового электродвигателя, приведены результаты его электромагнитного расчета. Рассмотрен способ выполнения обмотки для экспериментального образца беспазового электродвигателя.

**Ключевые слова:** беспазовая электрическая машина, магнитопровод, постоянные магниты, аморфный магнитомягкий материал.

The design of a phase-free electric machine with a magnetic core made of amorphous magnetically soft material and the features of such magnetic cores are considered. The design features of a gas-free electric motor are considered, and the results of its electromagnetic calculation are presented. A method of making a winding for an experimental sample of a phase-free electric motor is considered.

**Key words:** phase-free electric machine, magnetic circuit, permanent magnets, amorphous magnetically soft material.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 17-22*

**Перспективы развития интегрированных авиационных систем генерирования электроэнергии на примере электромеханического преобразователя на постоянных магнитах**

ОХОТНИКОВ М.В.

Приведено сравнение авиационных генераторов, применяемых в России и за рубежом, сопоставлены их параметры, тенденции развития и определены цели, к которым следует стремиться. Рассматриваются условия потенциальной ремонтпригодности для интегрированных генераторов, выполненных по классической методике и с применением T-LAM, что позволяет при необходимости уменьшить трудоемкость ремонта, материальные затраты и время ввода изделия в эксплуатацию. Рассмотрены технологические и эксплуатационные проблемы изготовления и эксплуатации интегрированного авиационного генератора мощностью 300 кВт при температуре более 180 °С. Предложены материалы для выполнения магнитопровода, обмотки и изолирующих элементов. Выполнена экспериментальная проверка путем нагрева предложенных материалов до температур более 300 °С.

**Ключевые слова:** авиационные генераторы, интегрированные системы генерирования электроэнергии, электромеханические преобразователи, стартер-генераторы, постоянные магниты.

The comparison of aviation generators used in Russia and abroad is given, their parameters, development trends are compared and the goals to be pursued are determined. The conditions of potential maintainability for integrated generators made according to the classical method

and using T-LAM are considered, which makes it possible, if necessary, to reduce the complexity of repairs, material costs and product commissioning time. The technological and operational problems of manufacturing and operating an integrated aviation generator with a capacity of 300 kW at a temperature of more than 180 ° C. are considered. Materials for making a magnetic circuit, winding and insulating elements are proposed. An experimental test was performed by heating the proposed materials to temperatures above 300 °C.

**Key words:** aviation generators, integrated power generation systems, electromechanical converters, starter generators, permanent magnets.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 23-26*

### **Углеродные нанотрубки в обмотках электрических машин**

ИВАНОВ М. В., ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ХАМЗИН Р.С.

Рассмотрены перспективы применения углеродных нанотрубок (УНТ) и композитных материалов на их основе для замены традиционных медных обмоток в синхронных машинах с постоянными магнитами. Проанализированы преимущества УНТ-обмоток, включая повышение электропроводности, снижение массы и улучшение тепловых характеристик. На основе экспериментальных данных показана потенциальная эффективность применения УНТ-обмоток для создания энергоэффективных тяговых электродвигателей, способствующих преодолению ключевых ограничений автономного электротранспорта.

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель, синхронные машины с постоянными магнитами, углеродные нанотрубки, композитные обмотки.

The prospects of using carbon nanotubes (CNTs) and composite materials based on them to replace traditional copper windings in synchronous machines with permanent magnets are considered. The advantages of CNT windings are analyzed, including increased electrical conductivity, weight reduction, and improved thermal performance. Based on experimental data, the potential effectiveness of using CNT windings to create energy-efficient traction electric motors that help overcome the key limitations of autonomous electric vehicles is shown.

**Key words:** traction electric motor, synchronous machines with permanent magnets, carbon nanotubes, composite windings.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 27-33*

**Тенденции и перспективы развития электромеханических преобразователей энергии и блоков силовой электроники для летательных аппаратов с электрической и гибридной силовой установкой**

ВАВИЛОВ В.Е., КАЛИТКА В.С., ВАСИЛЬКОВ Н.Д., АНДРЕЕВ Е.В.

Рассмотрено концептуальное состояние традиционной авиационной техники, показано, что для достижения технологического лидерства необходима разработка летательных аппаратов на основе электрических и гибридных силовых установок. Рассмотрено состояние развития электрических машин; показано, что удельная мощность электродвигателей, равная 16,1 кВт/кг, будет достигнута не ранее 2030 г. Показано, что для развития летательных аппаратов с гибридными и электрическими силовыми установками принципиально важно освоить серийный выпуск таких летательных аппаратов, получить сертификаты Росавиации или EASA, а также наработать достаточное количество летных часов на самолетах с такими электродвигателями.

**Ключевые слова:** летательные аппараты, электрическая силовая установка, гибридная силовая установка, электромеханические преобразователи энергии, блоки силовой электроники, тенденции и перспективы развития.

The conceptual state of traditional aviation technology is considered, and it is shown that in order to achieve technological leadership, it is necessary to develop aircraft based on electric and hybrid power plants. The state of development of electric machines is considered; it is shown that the specific power of electric motors, equal to 16.1 kW/kg, will be reached no earlier than 2030. It is shown that for the development of aircraft with hybrid and electric power plants, it is fundamentally important to master the serial production of such aircraft, obtain certificates from the Federal Air Transport Agency or EASA, and also gain a sufficient number of flight hours on aircraft with such electric motors.

**Key words:** aircraft, electric power plant, hybrid power plant, electromechanical energy converters, power electronics units, development trends and prospects.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 34-39*

**Расчет конструкций и анализ характеристик активного радиального магнитного подшипника**

ШАРАФУТДИНОВ Ш.Н., ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ВАВИЛОВ В.Е., КОБЗОВ Д.В.,  
ОХОТНИКОВ М.В.

Рассмотрено распределение магнитной связи между полюсами в активных магнитных подшипниках. Исследование выполнено на основе анализа электромагнитных характеристик четырех основных конфигураций магнитных полюсов: NNSS, NSNS, NNNN и SSSS. Выполнен расчет и сравнительный анализ электромагнитных сил, создаваемых конфигурациями NNSS и NSNS, что позволяет оценить их силовые возможности и эффективность. Для изучения явления магнитной связи и его влияния на распределение магнитной индукции выполнено моделирование эквивалентных магнитных цепей и верификация результатов методом конечных элементов. Установлены оптимальные конфигурации полюсов по критерию минимизации взаимного влияния магнитных цепей.

**Ключевые слова:** радиальный магнитный подшипник, активный магнитный подшипник, электромагнитные характеристики, распределение магнитной индукции, моделирование.

The distribution of the magnetic coupling between the poles in active magnetic bearings is considered. The study is based on an analysis of the electromagnetic characteristics of four main configurations of magnetic poles: NNSS, NSNS, NNNN and SSSS. The calculation and comparative analysis of the electromagnetic forces generated by the NNSS and NSNS configurations has been performed, which makes it possible to evaluate their power capabilities and efficiency. To study the phenomenon of magnetic coupling and its effect on the distribution of magnetic induction, simulation of equivalent magnetic circuits and verification of the results by the finite element method were performed. Optimal pole configurations have been established according to the criterion of minimizing the mutual influence of magnetic circuits.

**Key words:** radial magnetic bearing, active magnetic bearing, electromagnetic characteristics, magnetic induction distribution, modeling.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 40-44*

**О растворении редкоземельных постоянных магнитов в соляной кислоте**

ГОРБАТКОВ П.В., ОХОТНИКОВ М.В., ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ГОРЮХИН М.О.,  
ХАМЗИН Ф.С., ИВАНОВ М.В., СУЛТАНГАРЕЕВ Д.У., ШАЙХЛИСЛАМОВ А.И.

Рассмотрено поведение редкоземельных магнитов Nd-Fe-B (N45UH) и Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> в растворах соляной кислоты различной концентрации. Исследования выполнены с целью оценки растворимости и устойчивости материалов при эксплуатации установок в подземных агрессивных средах, содержащих HCl. Показано, что магниты Nd-Fe-B активно растворяются с образованием хлоридов неодима и железа, сопровождаясь выделением водорода, тогда как магниты Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> сохраняют структуру и химическую стойкость. Полученные результаты важны для выбора материалов и разработки методов защиты оборудования, работающего в условиях воздействия кислотных сред.

**Ключевые слова:** магниты Nd-Fe-B и Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>, соляная кислота, кинетика, коррозия.

The behavior of rare-earth magnets Nd-Fe-B (N45UH) and Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> in hydrochloric acid solutions of various concentrations is considered. The studies were carried out to assess the solubility and stability of materials during the operation of installations in underground aggressive environments containing HCl. It has been shown that Nd-Fe-B magnets actively dissolve to form neodymium and iron chlorides, accompanied by the release of hydrogen, while Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> magnets retain their structure and chemical resistance. The results obtained are important for the selection of materials and the development of methods for protecting equipment operating in acidic environments.

**Key words:** Nd-Fe-B and Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> magnets, hydrochloric acid, kinetics, corrosion.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 44-50*

**Терморегулирование электромеханических преобразователей энергии (Состояние и перспективы)**

ГОРЮХИН М.О., ТАТАУРОВ А.Н., ХАМЗИН Ф.С., ИВАНОВ М.В., СУЛТАНГАРЕЕВ Д.У., ШАЙХЛИСЛАМОВ А.И., ОХОТНИКОВ М.В., ИСМАГИЛОВ Ф.Р.

Повышение мощности и компактности электродвигателей, генераторов и трансформаторов напрямую связано с проблемой эффективного отвода тепла. Современные теплообменные аппараты перестали быть просто «радиаторами» и превратились в ключевой элемент интеллектуальной системы управления энергетической установкой. В статье рассмотрены современное состояние и перспективы развития технологий в области терморегулирования, обеспечивающие надежность и максимальный КПД преобразователей энергии.

**Ключевые слова:** электромеханические преобразователи энергии, терморегулирование, наножидкости, жидкостное и двухфазное охлаждение, интеллектуальные системы, цифровые двойники.

Increasing the power and compactness of electric motors, generators and transformers is directly related to the problem of efficient heat dissipation. Modern heat exchangers have ceased to be just «radiators» and have become a key element of an intelligent power plant management system. The article discusses the current state and prospects for the development of technologies in the field of thermal control, ensuring the reliability and maximum efficiency of energy converters.

**Key words:** electromechanical energy converters, thermal control, nanofluids, liquid and two-phase cooling, intelligent systems, digital twins.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 51-55*

### **Имитационная модель электрической силовой установки летательного аппарата с блоком суперконденсаторов**

ПОДГУЗОВ А.А., ХУСАИНОВ А.А., ХУСАИНОВА А.А., ДУРАКОВ А.С., ВАВИЛОВ В.Е.

Разработана математическая модель и проведены экспериментальные исследования электрической силовой установки с использованием суперконденсаторов. Проведены расчеты и экспериментальная верификация модели.

**Ключевые слова:** Суперконденсаторы; электрическая силовая установка; имитационная модель.

A mathematical model has been developed and experimental studies of an electric power plant using supercapacitors have been carried out. Calculations and experimental verification of the model have been carried out.

**Key words:** Supercapacitors; electric power plant; simulation model.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 56-61*

### **Шум электрических машин, возбуждаемый электромагнитными процессами**

ХАМЗИН Ф.С., ГОРЮХИН М.О., СУЛТАНГАРЕЕВ Д.У., ИВАНОВ М.В., ТАТАУРОВ А.И., ОХОТНИКОВ М.В.

Статья посвящена комплексной оценке электромагнитных, динамических и акустических характеристик электрических машин уже на стадии проектирования – до создания физического прототипа. Одним из наиболее эффективных инструментов для такой оценки является численное моделирование с использованием метода конечных элементов, позволяющее провести всесторонний анализ проектируемой конструкции. Современные методы и программные средства моделирования позволяют исследовать любые типы преобразования энергии. Разработанные и верифицированные подходы могут быть успешно применены к широкому спектру электромагнитных устройств.

**Ключевые слова:** электрические машины, контроль шума, моделирование, метод конечных элементов.

The article is devoted to a comprehensive assessment of the electromagnetic, dynamic and acoustic characteristics of electric machines already at the design stage – before the creation of a physical prototype. One of the most effective tools for such an assessment is numerical modeling using the finite element method, which allows for a comprehensive analysis of the projected structure. Modern methods and software modeling tools allow us to study any type of energy conversion. The developed and verified approaches can be successfully applied to a wide range of electromagnetic devices.

**Key words:** electric machines, noise control, modeling, finite element method.

## **Двухстадийная многокритериальная оптимизация синхронного электродвигателя с постоянными магнитами**

ШАПОВАЛОВ В.А., ВАРЮХИН А.Н., ГЕЛИЕВ А.В., КИСЕЛЕВ И.О.

Представлен метод двухстадийного оптимизационного проектирования синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. Метод сочетает в себе интерактивность, эволюционный алгоритм оптимизации, и двухэтапный подход, позволяющий получить как множество Парето-оптимальных решений в интересующей области пространства проектирования, так и единственное оптимальное решение, определенное взвешенным критерием. Модели, используемые для вычисления целевых значений выбраны по критериям максимизации достоверности результатов и минимизации времени вычислений. Такой подход позволяет построить фронт Парето и определить соответствующее требованиям и ограничениям оптимальное решение в течение двух-трех дней на одном современном ПК, при этом полученные характеристики существенно не изменяются после верификации результата с помощью более вычислительно тяжелых моделей. С помощью разработанного метода были существенно улучшены характеристики электродвигателя, разработанного ранее консервативным итерационным подходом.

**Ключевые слова:** синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, двухстадийная многокритериальная оптимизация, эволюционный алгоритм, множество Парето.

A method of two-stage optimization design of a synchronous electric motor with permanent magnets is presented. The method combines interactivity, an evolutionary optimization algorithm, and a two-step approach that allows you to obtain both a set of Pareto-optimal solutions in the area of interest in the design space, and a single optimal solution determined by a weighted criterion. The models used to calculate the target values are selected according to the criteria of maximizing the reliability of the results and minimizing the calculation time. This approach allows you to build a Pareto front and determine the optimal solution that meets the requirements and limitations within two to three days on one modern PC, while the obtained characteristics do not change significantly after verifying the result using more computationally heavy models. Using the developed method, the characteristics of the electric motor, previously developed by a conservative iterative approach, were significantly improved.

**Key words:** synchronous electric motor with permanent magnets, two-stage multi-criteria optimization, evolutionary algorithm, Pareto set.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 70-74*

### **Резистивное переключение в порошковых полупроводниковых материалах**

АЛЬТУДОВ Ю.К., ГАЕВ Д.С., РЕХВИАШВИЛИ С.Ш.

Приведены результаты экспериментального и теоретического исследования эффекта резистивного переключения в сжатых порошковых образцах кремния *n*- и *p*-типа, германия *p*-типа и оксида меди *p*-типа. Измеренные вольт-амперные характеристики имеют симметричную форму и гистерезис, площадь петель которого зависит от удельного сопротивления и дисперсности материала. Германий и оксид меди обладают сравнительно низкими коэффициентами теплопроводности, поэтому из-за недостаточного отвода тепла в этих материалах имеет место тепловой пробой; для кремния характерен лавинный пробой. Разработана теоретическая модель резистивного переключения в порошковом материале, основанная на применении функции активации и принципов автоматики. Расчеты, проведенные в рамках такой модели, качественно описывают полученные экспериментальные данные.

**Ключевые слова:** порошковые полупроводники, резистивное переключение, электрический пробой, мемристор, динамический гистерезис, имитационная модель.

The results of an experimental and theoretical study of the effect of resistive switching in compressed powder samples of *n*- and *p*-type silicon, *p*-type germanium, and *p*-type copper oxide are presented. The measured volt-ampere characteristics have a symmetrical shape and hysteresis, the loop area of which depends on the resistivity and dispersion of the material. Germanium and copper oxide have relatively low thermal conductivity coefficients, therefore, due to insufficient heat dissipation in these materials, thermal breakdown occurs; avalanche breakdown is characteristic of silicon. A theoretical model of resistive switching in a powder material based on the application of the activation function and the principles of automation has been developed. The calculations carried out within the framework of such a model qualitatively describe the experimental data obtained.

**Key words:** powder semiconductors, resistive switching, electrical breakdown, memristor, dynamic hysteresis, simulation model.

*Электротехника, 2025, №12, стр. 75-76*

**Авторы номера**

*Электротехника, 2025, №12, стр. 77-83*

**Список статей, опубликованных в журнале «Электротехника» в 2025 году**

*Электротехника, 2025, №12, стр. 84-85*

**Владимирский электромоторный завод  
(к 70-летию завода)**

*Электротехника, 2025, №12, стр.*

**Уважаемые читатели!**