

Содержание

Электротехника, 2025, №5, стр. 2-10

Обращенный реактивный магнитоэлектрический двигатель с магнитопроводящими зубцами во внешнем роторе

КАЗАКОВ Ю.Б., СМИРНОВ Д.С., КИСЕЛЕВ М.А.

Для привода устройств с внешней вращающейся частью целесообразно применение синхронных реактивных магнитоэлектрических электродвигателей обращенной конструкции с внешним вращающимся ротором и внутренним неподвижным статором. В обращенных двигателях с сегментными магнитами, немагнитными барьерами и магнитопроводящими зубцами между магнитами во внешнем роторе при небольшом числе пар полюсов повышаются максимальный вращающий момент, устойчивость работы, использование объема машины, динамические и энергетические характеристики, точность позиционирования и надежность крепления магнитов в роторе. Влияние дополнительного реактивного момента в обращенных магнитоэлектрических двигателях, вызываемого наличием магнитопроводящих зубцов во внешнем роторе, возрастает с уменьшением числа полюсов. Переходные электрохимические процессы в таких двигателях сглаживаются с уменьшением числа полюсов. Магнитопроводящие зубцы во внешнем роторе двигателя приводят к дополнительным пульсациям момента в установившемся режиме и увеличенному электромагнитному шуму. С уменьшением числа полюсов пульсации момента возрастают. С повышением магнитных свойств магнитов, снижением их требуемой толщины и соответствующим снижением высоты магнитопроводящих зубцов их влияние в обращенных магнитоэлектрических двигателях уменьшается. Применение демпферной обмотки с размещением ее между зубцами и магнитами во внешнем роторе сглаживает переходные электрохимические процессы, уменьшает пульсации момента, увеличивает период колебаний, приводит к дополнительным электрическим потерям.

Ключевые слова: синхронная реактивная электрическая машина, обращенная конструкция, внешний ротор с постоянными магнитами и магнитопроводящими зубцами.

To drive devices with an external rotating part, it is advisable to use synchronous reactive magnetoelectric electric motors of a reversed design with an external rotating rotor and an internal fixed stator. In reversed motors with segment magnets, non-magnetic barriers and magnetically conductive teeth between magnets in the external rotor, with a small number of pole pairs, maximum torque, stability of operation, use of machine volume, dynamic and energy characteristics, positioning accuracy and reliability of fastening magnets in the rotor increase. The effect of the additional reactive torque in reversed magnetoelectric motors caused by the presence of magnetically conductive teeth in the external rotor increases with a decrease in the number of poles. Transient electromechanical processes in such engines are smoothed out with a decrease in the number of poles. The magnetically conductive teeth in the external rotor of the motor lead to additional steady-state torque pulsations and increased electromagnetic noise. With a decrease in the number of poles, the moment pulsations increase. With an increase in the magnetic properties of magnets, a decrease in their required thickness and a corresponding decrease in the height of the magnetic conducting teeth, their influence in reversed magnetoelectric motors decreases. The use of a damping winding with its placement between the teeth and magnets in the external rotor smoothes out transient electromechanical processes, reduces moment pulsations, increases the oscillation period, and leads to additional electrical losses.

Key words: synchronous reactive electric machine, reversed configuration, external rotor with permanent magnets and magnetically conductive teeth.

Электротехника, 2025, №5, стр. 11-17

Разработка бесколлекторного электродвигателя с широким диапазоном регулирования механических характеристик

ЖИРНОВ А.А., КУДРЯШОВА О.Б.

Разработана общая концепция и создан макет нового варианта двигателя постоянного тока с обмотками на роторе и статоре. Двигатель сочетает преимущества бесколлекторных двигателей с постоянными магнитами на роторе (отсутствие щёточно-коллекторного узла) и коллекторных электродвигателей независимого (параллельного) возбуждения на электромагнитах (широкий и плавный диапазон

регулирования частоты вращения и крутящего момента на валу). Основное новшество заключается в преобразовании постоянного электрического тока в переменный частотой 98,4 кГц для беспроводного питания обмотки ротора электродвигателя. Рассмотрены принципиальная и электрическая схемы, рабочий макет варианта двигателя, результаты испытаний, массогабаритные характеристики.

Ключевые слова: бесколлекторный электродвигатель, вентильный электродвигатель, механические характеристики, диапазон регулирования.

A general concept has been developed and a layout of a new version of a DC motor with windings on the rotor and stator has been created. The motor combines the advantages of brushless motors with permanent magnets on the rotor (no brush-collector assembly) and collector electric motors of independent (parallel) excitation on electromagnets (wide and smooth range of speed control and torque on the shaft). The main innovation is the conversion of direct electric current into alternating current with a frequency of 98.4 kHz for wireless power supply of the rotor winding of the electric motor. The basic and electrical diagrams, the working layout of the engine variant, test results, and weight and size characteristics are considered.

Key words: brushless electric motor, valve electric motor, mechanical characteristics, control range.

Электротехника, 2025, №5, стр. 18-21

Особенности расчета магнитной цепи коллекторных микродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами и полым якорем

ВСТОВСКИЙ С.А., ПАХОМОВ А.Н., ФЕДИЙ К.С., АФАНАСЬЕВ С.Н.

При расчете магнитной цепи электрической машины по классической методике не учитываются особенности конструкции, приводящие к неравномерному распределению магнитного поля, что влечет за собой некорректное определение среднего значения индукции магнитного поля, а при конструировании машины – к насыщению магнитной цепи или недоиспользованию материалов. На базе аналитического метода и численного моделирования магнитостатических процессов методом конечных элементов уточнена методика расчета магнитной цепи микродвигателя постоянного тока с постоянными магнитами и полым якорем. На начальном этапе проектирования это поможет

правильно определить индукцию в магнитной цепи и достичь лучших эксплуатационных показателей двигателя.

Ключевые слова: коллекторные микродвигатели постоянного тока, магнитная цепь, постоянные магниты, полый якорь, Ansys Maxwell, расчет.

When calculating the magnetic circuit of an electric machine according to the classical method, the design features leading to an uneven distribution of the magnetic field are not taken into account, which leads to an incorrect determination of the average value of the magnetic field induction, and when designing the machine, to saturation of the magnetic circuit or underutilization of materials. Based on the analytical method and numerical modeling of magnetostatic processes by the finite element method, a method for calculating the magnetic circuit of a DC micromotor with permanent magnets and a hollow armature has been refined. At the initial design stage, this will help to correctly determine the induction in the magnetic circuit and achieve better engine performance.

Key words: collector DC micromotors, magnetic circuit, permanent magnets, hollow armature, Ansys Maxwell, calculation.

Электротехника, 2025, №5, стр. 22-27

Способ детектирования феррорезонанса в силовых трансформаторах и реакторах КОСАРЕВ Б.А.

Аварийные режимы работы сети, возникающие при коротких замыканиях и вследствие неправильной работы устройств релейной защиты и автоматики, могут быть причиной возникновения и развития феррорезонансных процессов, в том числе, в силовых трансформаторах и реакторах. При возникновении феррорезонанса вибрация магнитопровода трансформатора или реактора и гармонические искажения напряжения и тока сети усиливаются мгновенно по сравнению с длительностью процесса нагрева электрооборудования выше допустимой температуры. Гармонические искажения напряжения и тока могут быть вызваны нелинейным характером нагрузки потребителя. Поэтому рациональным способом выявления феррорезонансного процесса в силовых трансформаторах и реакторах представляется его детектирование через изменение уровня вибрации магнитопровода. В статье рассмотрено устройство для выявления

феррорезонансного процесса в силовых трансформаторах и реакторах через измерение уровня вибрации магнитопровода. Предложена конструкция устройства для детектирования феррорезонансного процесса при больших значениях напряженности магнитного поля и повышенной температуре. Принятые технические решения позволяют снизить шумы и наводки в информационном канале устройства за счет экранирования полезного сигнала при помощи тонкопленочной металлизации, уменьшить нагрев чувствительного элемента устройства токами Фуко, и перемангничивания путем исключения массивных металлических сборочных единиц и исполнения инерционной массы в виде пакета склеенных между собой листов металла с высоким удельным электрическим сопротивлением, использования пьезоэлектрической пластины и магнитной платформы, выполненных из материалов с высокой температурой Кюри.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, реакторы, феррорезонанс, пьезоэлектрический акселерометр, тонкопленочная металлизация, магнитострикционные деформации, инерционная масса.

Emergency modes of network operation that occur during short circuits and due to improper operation of relay protection and automation devices can be the cause of the occurrence and development of ferroresonance processes, including in power transformers and reactors. When a ferroresonance occurs, the vibration of the magnetic core of the transformer or reactor and the harmonic distortions of the mains voltage and current increase instantly compared to the duration of the heating process of electrical equipment above the permissible temperature. Harmonic distortion of voltage and current can be caused by the non-linear nature of the consumer's load. Therefore, a rational way to detect the ferroresonance process in power transformers and reactors is to detect it by changing the vibration level of the magnetic circuit. The article discusses a device for detecting the ferroresonance process in power transformers and reactors by measuring the vibration level of a magnetic circuit. A design of a device for detecting a ferroresonance process at high magnetic field strengths and elevated temperatures is proposed. The adopted technical solutions make it possible to reduce noise and interference in the information channel of the device by shielding the useful signal using thin-film metallization, reduce the heating of the sensitive element of the device by Foucault currents, and remagnetization by eliminating massive metal assembly units and performing an inertial mass in the form of a package of metal sheets glued together with high electrical resistivity, using a piezoelectric plate and a magnetic platform made of materials with a high Curie

temperature.

Key words: power transformers, reactors, ferroresonance, piezoelectric accelerometer, thin-film metallization, magnetostrictive deformations, inertial mass.

Электротехника, 2025, №5, стр. 28-32

Экспериментальная проверка силовых полупроводниковых приборов на тепловую устойчивость к статическим и динамическим токовым перегрузкам
ХОРОЛЬСКИЙ В.Я., ИСУПОВА А.М. ЮНДИН К.М., ШАРИПОВ И.К.

Рассмотрено обоснование системы диагностики технического состояния силовых полупроводниковых приборов, построенной на принципах неразрушающего контроля. Дана оценка современного состояния средств защиты полупроводниковых изделий. Приведены теоретические предпосылки, составляющие основу разработки подобных систем и результаты экспериментальных исследований на опытном образце устройства.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, статические и динамические токовые перегрузки, тепловая устойчивость, эксперимент.

The substantiation of a system for diagnosing the technical condition of power semiconductor devices based on the principles of non-destructive testing is considered. An assessment of the current state of protection of semiconductor products is given. The theoretical prerequisites that form the basis for the development of such systems and the results of experimental studies on a prototype device are presented.

Key words: power semiconductor devices, static and dynamic current overloads, thermal stability, experiment.

Электротехника, 2025, №5, стр. 33-38

О применении теории синхронных машин к анализу электромагнитных и энергетических процессов в автономном дизель-генераторном агрегате
ГЕРМАН-ГАЛКИН С.Г.

Выполнен анализ электромагнитных и энергетических процессов в синхронном

явнополюсном генераторе с электромагнитным возбуждением в составе автономного дизель-генераторного агрегата. В отличие от классической теории синхронных машин в математической модели и при расчете электромагнитных, электромеханических и энергетических характеристик СГучтены взаимозависимость тока синхронного генератора, его угла нагрузки и ЭДС, физические зависимости и ограничения, связанные с конструкцией генератора и структурой всего дизель-генераторного агрегата.

Ключевые слова: автономный дизель-генераторный агрегат, синхронный генератор, электромагнитные и энергетические процессы, теория синхронных машин.

The analysis of electromagnetic and energy processes in a synchronous single-pole generator with electromagnetic excitation as part of an autonomous diesel generator set is performed. In contrast to the classical theory of synchronous machines, the mathematical model and calculation of electromagnetic, electromechanical and energy characteristics take into account the interdependence of the synchronous generator current, its load angle and EMF, physical dependencies and limitations associated with the generator design and the structure of the entire diesel generator set.

Key words: autonomous diesel generator set, synchronous generator, electromagnetic and energy processes, theory of synchronous machines.

Электротехника, 2025, №5, стр. 39-43

Многодисковый электропривод для борьбы с гололедом воздушных линий
ЯНГИРОВ И.Ф., КАБИРОВ А.М.

Предложена конструкция комбинированного многодискового электропривода для борьбы с гололедом воздушных линий. Составлена обобщенная математическая модель, ее аналитическое решение, рассмотрены его частные случаи. Предложенная конструкция может найти широкое применение не только в энергетике, но и в машиностроении, станкостроении, электромашиностроении и т.д.

Ключевые слова: воздушные линии, гололед, устройства для скалывания льда, многодисковый электропривод.

The paper proposes an original design – a combined multi-disc electric drive to combat ice on overhead lines. A generalized mathematical model with an analytical solution is compiled, and special cases of the obtained solution are considered. The proposed design can be widely used not only in the energy sector, but also in mechanical engineering, machine tool construction, electrical engineering, etc.

Key words: overhead lines, ice, ice chipping devices, multi-disc electric drive.

Электротехника, 2025, №5, стр. 44-48

Механические свойства нового изоляционного материала для высоковольтных электрических машин

БОЕВ М.А., ВАССУФ Л.А.

В статье рассмотрены эксплуатационные свойства новых изоляционных лент типа ЛСКВ, используемых в качестве электрической изоляции в высоковольтном оборудовании. Приведены экспериментальные результаты по изучению механических свойств указанного материала, представляющего собой композит, который содержит различные типы наполнителей – слюдяную бумагу и стеклоткань.

Ключевые слова: изоляционный материал, механические свойства, слюдяная бумага, стеклоткань.

The article considers the operational properties of new insulating tapes of the LSKV type used as electrical insulation in high-voltage equipment. This article presents experimental results on the study of the mechanical properties of the specified material, which is a composite that contains various types of fillers – mica paper and glass cloth.

Key words: mechanical properties, insulating material, mica paper, glass cloth.

Электротехника, 2025, №5, стр. 49-55

О снижении гармоник напряжений в устройствах индукционного нагрева с питанием от транзисторного преобразователя частоты

БУКАНИН В.А., ИВАНОВ А.Н., ВОЛОГДИН В.В., ВОЛОГДИН Вл.В.

При подключении к промышленным сетям электротермического оборудования и других нелинейных источников с преобразователями напряжения возможно возникновение низкочастотных и высокочастотных кондуктивных помех. Вызванные этим проблемы приходится решать в основном в заводских условиях путем мониторинга помех и их подавлением. Экспериментальные исследования индукционных нагревательных установок с генераторами серии ВГТ показали необходимость использования для них средств защиты от помех. В статье проведено исследование искажения синусоидальности напряжения, гармоник напряжения и высокочастотных кондуктивных помех в сети при подключении индукционной установки с транзисторным преобразователем частоты серии ВГТ 8-60/66, оснащенного пассивным LC фильтром. Показана эффективность его использования по сравнению с ранее выпускаемыми установками. Полученные результаты дают возможность более глубоко изучить имеющиеся проблемы и наметить дальнейшие пути решения возникающих задач при проектировании индукционных установок с высокочастотными транзисторными генераторами.

Ключевые слова: индукционный нагрев, транзисторный генератор, электромагнитная совместимость, кондуктивные помехи, гармоники напряжений.

When connecting electrothermal equipment and other nonlinear sources with voltage converters to industrial networks, low-frequency and high-frequency conductive interference may occur. The problems caused by this have to be solved mainly in the factory by monitoring interference and its pressure. Experimental studies of induction heating installations with generators of the VGT series have shown the need to use anti-interference equipment for them. The study of voltage sinusoidal distortion, voltage harmonics and high-frequency conductive interference in the network was carried out when connecting an induction installation with a transistor frequency converter of the VGT 8-60/66 series equipped with a passive LC filter. The effectiveness of its use in comparison with previously manufactured installations is shown. The results obtained make it possible to study the existing problems in more depth and outline further ways to solve emerging problems in the design of induction installations with high-frequency transistor generators.

Key words: induction heating, transistor generator, electromagnetic compatibility, conductive interference, voltage harmonics.

Электротехника, 2025, №5, стр. 56-63

Аппаратно-программный комплекс для определения термоэлектрических свойств промышленных металлических сплавов

ГОНЧАРОВ А.Л., ЧУЛКОВ И.С., КОЗЫРЕВ Х.М.

Статья посвящена разработке установки для исследования термоЭДС металлических материалов из числа промышленно выпускаемых сплавов различного назначения.

Установка позволяет проводить измерения термоЭДС при помощи термопар, изготовленных из исследуемых сплавов, синхронно с измерением температуры. Для измерения использовался интегральный метод с последующей математической обработкой для вычисления коэффициента термоЭДС. Оценена погрешность математической обработки, значения коэффициента термоЭДС проверены по данным других работ, где использовался точный дифференциальный метод измерения.

Получены температурные кривые коэффициента термоЭДС для 73 марок промышленных сплавов, среди которых легированные стали, сплавы на основе никеля, титана, а также некоторые тугоплавкие металлы. Анализ полученных данных с помощью методов машинного обучения позволил выявить обобщенные особенности изменения термоЭДС для исследованных групп материалов и классифицировать их по виду кривых термоЭДС. Разработана и обучена модель для прогнозирования значения коэффициента термоЭДС для новых материалов, основанная на регрессии экспериментальных данных. Для увеличения точности прогнозов измеренные значения использовались не только в качестве обучающего отклика модели, но и в качестве дополнительных признаков наряду с данными о химическом составе сплава.

Ключевые слова: промышленные металлические сплавы, термоЭДС, термоэлектрический эффект, коэффициент термоЭДС, машинное обучение, интегральный метод.

The article is devoted to the development of an installation for the study of thermal EMF of metal materials from among industrially produced alloys for various purposes. The installation allows thermal EMF measurements to be carried out using thermocouples made of the studied alloys in sync with temperature measurement. An integral method was used for the measurement, followed by mathematical processing to calculate the thermal EMF coefficient. The error of mathematical processing was estimated, the values of the thermal EMF

coefficient were verified according to other works where an accurate differential measurement method was used. Temperature curves of the thermal EMF coefficient were obtained for 73 grades of industrial alloys, including alloy steels, nickel-based alloys, titanium, as well as some refractory metals. The analysis of the obtained data using machine learning methods made it possible to identify generalized features of changes in thermal EMF for the studied groups of materials and classify them by the type of thermal EMF curves. A model has been developed and trained to predict the value of the thermal EMF coefficient for new materials based on regression of experimental data. To increase the accuracy of forecasts, the measured values were used not only as a training response of the model, but also as additional features along with data on the chemical composition of the alloy.

Key words: industrial metal alloys, thermal EMF, thermoelectric effect, thermal EMF coefficient, machine learning, integral method.

Электротехника, 2025, №5, стр. 64-73

К 80-летию кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института
ЗЕЧИХИН Б.С., КОВАН Ю.И., КРЮЧКОВ В.В., ПЕНКИН В.Т., КОВАЛЕВ К.Л.

Электротехника, 2025, №5, стр. 74-76

Авторы номера

Электротехника, 2025, №5, стр. 77-78

Поправка