

Содержание

Электротехника, 2025, №6, стр. 2-6

Зависимость электрической прочности воздуха в неоднородном электрическом поле от концентрации озона в промежутке

МАКСУДОВ Д.В.

Рассмотрены результаты экспериментов по исследованию электрической прочности воздушного промежутка между электродами стержень – цилиндр при различной концентрации озона в промежутке. Предложена математическая модель лавинно-стримерного перехода в неоднородном электрическом поле с учетом состава газовой смеси. Расчетные и экспериментальные зависимости электрической прочности воздуха от концентрации озона хорошо согласуются между собой и свидетельствуют о некотором росте пробивного напряжения при увеличении концентрации озона.

Ключевые слова: электрическая прочность воздуха, неоднородное электрическое поле, электронная лавина, коэффициент ударной ионизации.

The results of experiments on the study of the electrical strength of the air gap between rod–cylinder electrodes at different concentrations of ozone in the gap are considered. A mathematical model of the avalanche-streamer transition in an inhomogeneous electric field is proposed, taking into account the composition of the gas mixture. The calculated and experimental dependences of the electrical strength of air on the ozone concentration are in good agreement with each other and indicate a slight increase in breakdown voltage with increasing ozone concentration.

Key words: electrical strength of air, inhomogeneous electric field, electron avalanche, shock ionization coefficient.

Электротехника, 2025, №6, стр. 7-14

Расчёт магнитного поля беспазового двигателя с постоянными магнитами и

дробными катушечными обмотками

ШЕВЧЕНКО О.А., ГЕЙНРИХ Г.О. ШЕВЧЕНКО А.Ф.

Рассмотрена модель беспазовой электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов для аналитического расчёта, высокая степень точности которого была обоснована путём сравнения с результатами численного моделирования.

Ключевые слова: беспазовые электрические машины, магнитоэлектрическое возбуждение, дробные обмотки, магнитное поле, расчет.

A model of a phase-free electric machine with permanent magnet excitation for analytical calculation is considered, the high degree of accuracy of which was justified by comparison with the results of numerical modeling.

Key words: phase-free electric machines, magnetolectric excitation, fractional windings, magnetic field, calculation.

Электротехника, 2025, №6, стр. 15-23

Повышение эффективности применения дробных зубцовых обмоток в трехфазных многополюсных электрических машинах

КАЗАКОВ Ю.Б.

В трехфазных дробных зубцовых обмотках многополюсных электрических машин возможно совмещение двух трехфазных обмоток, одна из которых соединена по схеме «звезда», другая – по схеме «треугольник», с отличающимися числами витков в фазах и разными по сечению проводами; оси обмоток смещены на угол $\pi/6$. Обмотки соединены параллельно или последовательно, совмещенная обмотка включается на трехфазное напряжение сети от одного источника. По электромагнитным свойствам трехфазная совмещенная дробная зубцовая обмотка аналогична шестифазной дробной зубцовой обмотке. Определена возможность выполнения симметричных трехфазных совмещенных дробных зубцовых обмоток при разных соотношениях чисел пазов и полюсов. Число пазов на полюс должно составлять $6/5$, число пар полюсов быть кратным пяти, или число пазов на полюс должно составлять $6/7$, а число пар полюсов быть кратным семи. Приведены примеры выполнения обмоток, рассчитаны их обмоточные коэффициенты. Показано, что для основной гармоники обмоточный коэффициент трехфазных совмещенных дробных зубцовых обмоток достигает

0,9659258, что на 3,52 % больше, чем для дробных зубцовых, но несовмещенных обмоток. Подтверждена эффективность применения совмещенных дробных зубцовых обмоток в трехфазных многополюсных электрических машинах. Применение регулируемого частотного электропривода повышает перспективы использования совмещенных дробных зубцовых обмоток в трехфазных электродвигателях. Совмещенные дробные зубцовые обмотки с последовательным соединением схем «звезда» и «треугольник» имеют лучшие потенциальные условия при возникающих волновых процессах в случае питания электродвигателя от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения.

Ключевые слова: трехфазные многополюсные машины, трехфазные дробные зубцовые обмотки, совмещение схем звезда–треугольник, обмоточный коэффициент, повышение эффективности.

In three-phase fractional tooth windings of multipole electric machines, it is possible to combine two three-phase windings, one of which is connected according to the «star» scheme, the other according to the «triangle» scheme, with different numbers of turns in phases and wires of different cross-sections; the axes of the windings are offset by an angle of $\pi/6$. The windings are connected in parallel or in series, the combined winding is switched on to a three-phase mains voltage from a single source. In terms of electromagnetic properties, a three-phase combined fractional tooth winding is similar to a six-phase fractional tooth winding. The possibility of making symmetrical three-phase combined fractional tooth windings with different ratios of the numbers of slots and poles is determined. The number of slots per pole should be $6/5$, the number of pole pairs should be a multiple of five, or the number of slots per pole should be $6/7$, and the number of pole pairs should be a multiple of seven. Examples of the windings are given, and their winding coefficients are calculated. It is shown that for the main harmonic, the winding coefficient of three-phase combined fractional toothed windings reaches 0,9659258, which is 3,52% more than for fractional toothed but misaligned windings. The effectiveness of using combined fractional tooth windings in three-phase multi-pole electric machines has been confirmed. The use of an adjustable frequency electric drive increases the prospects for using combined fractional tooth windings in three-phase electric motors. Combined fractional tooth windings with a serial connection of the «star» and «triangle» circuits have the best potential conditions for emerging wave processes in the case of an electric motor powered by a frequency converter with pulse width voltage

modulation.

Keywords: three-phase multipole machines, three-phase fractional tooth windings, combination of star–triangle circuits, winding coefficient, increased efficiency.

Электротехника, 2025, №6, стр. 24-29

Математическая модель магнитоэлектрического вентильного двигателя в полярных координатах

АФАНАСЬЕВ А.А.

Предложена двухмерная математическая модель магнитоэлектрического вентильного двигателя в полярных координатах, основанная на решении уравнения Лапласа для внутренности кругового кольца методом разделения переменных Фурье, как краевой задачи Дирихле относительно скалярного магнитного потенциала. Краевая задача Неймана относительно магнитной индукции в кольце решается путем дифференцирования магнитного потенциала по радиальной координате при использовании постоянных Фурье первой краевой задачи Дирихле. Активные части магнитной цепи двигателя представлены в виде совокупности структурно однородных круговых колец ярем сердечников, магнитов, зубцов статора, воздушного зазора. Неизвестные постоянные Фурье, две для каждого кольца, находятся из граничных условий магнитного поля для общих границ колец: магнитные потенциалы и индукции на границах не испытывают скачков. Если на границах колец располагаются магнитные листы обмоток, то скачок потенциала равен полному току этих листов.

Ключевые слова: магнитоэлектрический вентильный двигатель, магнитная индукция, электромагнитный момент, реактивный момент, математическая модель, полярные координаты, уравнение Лапласа, краевые задачи Дирихле и Неймана, постоянные Фурье.

A two-dimensional mathematical model of a magnetoelectric valve motor in polar coordinates is proposed, based on the solution of the Laplace equation for the interior of a circular ring by the method of separation of Fourier variables, as a Dirichlet boundary value problem with respect to the scalar magnetic potential. The Neumann boundary value problem with respect to magnetic induction in a ring is solved by differentiating the magnetic potential along the

radial coordinate using Fourier constants of the first Dirichlet boundary value problem. The active parts of the magnetic circuit of the engine are represented as a set of structurally homogeneous circular rings of core pits, magnets, stator teeth, and air gap. The unknown Fourier constants, two for each ring, are found from the boundary conditions of the magnetic field for the common boundaries of the rings: magnetic potentials and inductions at the boundaries do not experience jumps. If magnetic sheets of windings are located at the boundaries of the rings, then the potential jump is equal to the total current of these sheets.

Key words: magnetoelectric valve motor, magnetic induction, electromagnetic moment, reactive moment, mathematical model, polar coordinates, Laplace equation, Dirichlet and Neumann boundary value problems, Fourier constants.

Электротехника, 2025, №6, стр. 30-35

Уравнение синтеза модального регулятора в векторно-матричной форме

ПАХОМОВ А.Н., БРАЖНИКОВ А.В., ВСТОВСКИЙ С.А.

Одним из наиболее перспективных методов синтеза управляющих устройств, используемых в многомерных системах электропривода высокого порядка, является модальное управление, обеспечивающее в замкнутой системе управления заданное распределение корней ее характеристического уравнения, которым соответствуют желаемые составляющие (моды) свободного движения системы. Определены выражения для расчета коэффициентов модального регулятора в векторно-матричной форме, удобной для синтеза замкнутых непрерывных систем электропривода высокого порядка. Полученные выражения для расчета коэффициентов модального регулятора в векторно-матричной форме позволяют выполнить синтез замкнутых непрерывных систем электропривода высокого порядка, обеспечивая при этом показатели качества системы управления электропривода, близкие к желаемым, за счет снижения погрешности расчетов.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, система автоматического управления, синтез управляющих устройств, модальное управление, коэффициенты модального регулятора, расчет, векторно-матричный метод.

One of the most promising methods for synthesizing control devices used in multidimensional high-order electric drive systems is modal control, which provides a given distribution of the

roots of its characteristic equation in a closed control system, which correspond to the desired components (modes) of the free movement of the system. Expressions for calculating the coefficients of a modal controller in a vector-matrix form convenient for the synthesis of closed continuous high-order electric drive systems are defined. The expressions obtained for calculating the coefficients of the modal controller in vector-matrix form make it possible to synthesize closed continuous electric drive systems of a high order, while providing quality indicators of the electric drive control system close to the desired ones by reducing the calculation error.

Key words: automated electric drive, automatic control system, synthesis of control devices, modal control, coefficients of the modal controller, calculation, vector-matrix method.

Электротехника, 2025, №6, стр. 36-46

Схемотехника, конструкции преобразователей и алгоритмы управления тяговыми электроприводами

ФЛОРЕНЦЕВ С.Н., УВАРОВ А.А., БАЙДА С.В., ЖУРОВ И.О.

В статье подробно освещаются требования к конкретным характеристикам и экономичности преобразователей для электромеханических трансмиссий различных транспортных средств мощностью более 100 кВт, внедрение которых позволит успешно использовать их в транспортных средствах вместо механических и гидромеханических трансмиссий. Показаны три типа преобразователей частоты, их компактные конструкции в герметичных корпусах с жидкостным охлаждением и защитой IP67, разработанные ООО «Русэлпром» и успешно внедренные в комплекты тягового электрооборудования ряда транспортных средств. Описаны алгоритмы оптимального управления в преобразователях частоты для тяговых электроприводов с предварительным определением параметров электродвигателей, обеспечивающие высокий КПД, динамику, стабильную работу в широком диапазоне мощности и скоростей вращения.

Ключевые слова: тяговый электропривод, преобразователи, схемотехника, конструкции, алгоритмы управления.

The article highlights the requirements for specific characteristics and cost of frequency converters for electromechanical transmissions of various vehicles with a capacity of more than 100 kW, the implementation of which will allow them to be successfully used in vehicles instead of mechanical and hydromechanical transmissions. Three types of frequency converters, their compact designs in sealed housings with liquid cooling and IP67 protection, developed by «Ruselprom» LLC and successfully implemented in traction electrical equipment sets of a number of vehicles, are shown. Algorithms for optimal control in frequency converters for traction electric drives with preliminary determination of the parameters of electric motors, with high efficiency, dynamics, stable operation in a wide range of power and rotation speeds are described.

Key words: traction electric drive, converters, circuit engineering, structures, control algorithms.

Электротехника, 2025, №6, стр. 47-53

Подсистема беспроводной передачи энергии для зарядки бортовых батарей БПЛА с вертикальным взлетом/посадкой

БУРЛАКА В.В., ГУЛАКОВ С.В., ГОЛОВИН А.Ю.

Предложено схемное решение подсистемы беспроводной зарядки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с вертикальным взлетом/посадкой, дано описание ее работы. Подсистема рассчитана на работу с воздушными катушками без ферромагнитных сердечников с целью уменьшения массы приемной части, устанавливаемой на БПЛА. Предложен вариант автоматического определения наличия приемника в поле передающей катушки и способ организации передачи данных от приемника к передатчику для управления процессом зарядки аккумуляторных батарей БПЛА. Приведены результаты экспериментов при работе подсистемы с разными расстояниями между катушками, осциллограммы напряжений и токов, тепловые изображения катушек и оценка их нагрева. Выявлены основные элементы, определяющие потери энергии при работе, определены пути повышения эффективности и дальнейшего совершенствования разработанной подсистемы.

Ключевые слова: БПЛА, беспроводная передача энергии, воздушный трансформатор, резонансный трансформатор, инвертор, синхронный выпрямитель, зарядка аккумуляторов.

A schematic solution of a subsystem for wireless charging of unmanned aerial vehicles (UAV) with vertical takeoff/landing is proposed, and a description of its operation is given. The subsystem is designed to work with air coils without ferromagnetic cores in order to reduce the mass of the receiving part mounted on the UAV. An option for automatically detecting the presence of a receiver in the field of the transmitting coil and a method for organizing data transmission from the receiver to the transmitter to control the charging process of the UAV batteries is proposed. The results of experiments during the operation of a subsystem with different distances between coils, voltage and current waveforms, thermal images of coils and an estimate of their heating are presented. The main elements that determine energy losses during operation are identified, and ways to increase efficiency and further improve the developed subsystem are identified.

Key words: UAV, wireless power transmission, air transformer, resonant transformer, inverter, synchronous rectifier, battery charging.

Электротехника, 2025, №6, стр. 54-58

Электромагнитный компенсатор токов нулевой последовательности для электрической сети низкого напряжения

КОБЗИСТЫЙ О.В.

Дана оценка влияния тока нулевой последовательности основной и высших гармоник на функционирование низковольтной электрической сети. Для снижения негативного влияния тока нулевой последовательности предложено использовать специальные технические средства – компенсаторы токов нулевой последовательности. Показаны основы проектирования таких устройств в виде продольного и поперечного включения различной комбинации дуальных электромагнитных устройств с одной или двумя обмотками, подобно гармоническим фильтрам низших или высших частот. Приведены математическая модель одной из возможных схем компенсатора токов нулевой последовательности основной и высших гармоник и экспериментальная оценка работоспособности такого устройства; показана эффективность этих устройств для снижения токов нулевой последовательности.

Ключевые слова: электрическая сеть низкого напряжения, токи нулевой

последовательности, токи высших гармоник, электромагнитный компенсатор, дуальные электромагнитные устройства.

The influence of the current of the zero sequence of the fundamental and higher harmonics on the functioning of a low-voltage electrical network is estimated. To reduce the negative effect of the zero–sequence current, it is proposed to use special technical means – zero-sequence compensators. The basics of designing such devices are shown in the form of longitudinal and transverse inclusion of various combinations of dual electromagnetic devices with one or two windings, similar to harmonic filters of low or high frequencies. A mathematical model of one of the possible zero-sequence compensator circuits of the fundamental and higher harmonics and an experimental assessment of the operability of such a device are given; the effectiveness of these devices for reducing zero-sequence currents is shown.

Key words: low voltage electrical network, zero-sequence currents, higher harmonic currents, electromagnetic compensator, dual electro-magnetic devices.

Электротехника, 2025, №6, стр. 59-64

Параметрический анализ участка тяговой сети железных дорог переменного тока
ТРЯПКИН Е.Ю., ИГНАТЕНКО И.В., ВЛАСЕНКО С.А., ШУРОВА Н.К.

На основании анализа параметров системы тягового электроснабжения реальной межподстанционной зоны построен алгоритм расчета сопротивления тяговой сети. Для определения зарезервированных значений напряжений и токов тяговой сети предложена схема установки приборов для сбора данных на тяговых подстанциях; на основе этих данных получено изменение измеренных значений в зависимости от мгновенных схем. На базе имеющихся реальных данных выполнено моделирование участка тяговой сети, на основании которого рассчитаны сопротивления тяговой сети. Для определения падения напряжения и комплексного сопротивления участка тяговой сети проведены расчёты режимов системы тягового электроснабжения в имитационной модели. Показана высокая сходимость потерь напряжения в тяговой сети и результатов расчета в программном комплексе.

Ключевые слова: тяговая сеть железных дорог переменного тока, участок тяговой сети, параметрический анализ, имитационное моделирование.

Based on the analysis of the parameters of the traction power supply system of a real substation zone, an algorithm for calculating the resistance of the traction network is constructed. To determine the reserved values of the voltages and currents of the traction network, a scheme for installing devices for data collection at traction substations is proposed; based on these data, a change in the measured values depending on the instantaneous circuits is obtained. Based on the available real data, a section of the traction network was modeled, on the basis of which the traction network resistances were calculated. To determine the voltage drop and the complex resistance of the traction network section, calculations of the modes of the traction power supply system in a simulation model were carried out. The high convergence of voltage losses in the traction network and the calculation results in the software package is shown.

Key words: traction network of AC railways, traction network section, parametric analysis, simulation modeling.

Электротехника, 2025, №6, стр. 65-71

Износостойкость электродов дугогасительных устройств элегазовых выключателей

ЧЕМЕРИС В.С.

Рассмотрены результаты исследований износостойкости электродов из углеграфитовых материалов, композиционного материала W-Ag (КМК-А61), молибден-медных сплавов, сплава Cr-Cu-W, чистого вольфрама и высокоуглеродистой стали У8, применяемых в дугогасительных устройствах элегазовых выключателей. За критерий износостойкости принят удельный износ материала – отношение потери объема к значению эквивалента энергии, воздействующего на элементы дугового устройства. Установлены особенности эрозионных процессов углеграфитовых электродов и фторопластовых сопел в дуговом разряде в элегазе. Показано, что наибольшей износостойкостью обладают электроды из углеграфитовых материалов с мелкозернистой структурой, низким содержанием золы и высокой плотностью, легированные соединениями титана и бора. Установлена износостойкость электродов из композита W-Ag, молибден-медных сплавов, сплава Cr-Cu-W, чистого вольфрама и высокоуглеродистой стали У8. Определены особенности эрозии электродов из этих материалов при отключении токов короткого замыкания в элегазе. Обосновано применение углеграфитовых материалов

как альтернативе электродам из композитов W-Cu и W-Ag ввиду меньшего износа электродов и сопровождающего его меньшего износа фторопластовых сопел. Для дугогасительных устройств элегазовых автокомпрессионных выключателей с односторонним газовым потоком установлен преимущественный износ электрода, расположенного ниже по потоку газа.

Ключевые слова: элегазовые выключатели, дугогасительные устройства, износостойкость электродов.

The results of studies of wear resistance of electrodes made of carbon graphite materials, W-Ag composite material (КМК-А61), molybdenum-copper alloys, Cr-Cu-W alloy, pure tungsten and high-carbon steel U8 used in arc extinguishing devices of gas-fired switches are considered. The specific wear of the material is taken as the criterion of wear resistance – the ratio of volume loss to the value of the equivalent energy acting on the elements of the arc device. The features of erosion processes of carbon graphite electrodes and fluoroplastic nozzles in an electric arc discharge are established. It is shown that electrodes made of carbon graphite materials with fine-grained structure, low ash content and high density, doped with titanium and boron compounds, have the greatest wear resistance. The wear resistance of electrodes made of W-Ag composite, molybdenum-copper alloys, Cr-Cu-W alloy, pure tungsten and high-carbon steel U8 has been established. The features of erosion of electrodes made of these materials during disconnection of short-circuit currents in the gas are determined. The use of carbon graphite materials as an alternative to electrodes made of W-Cu and W-Ag composites is justified due to lower wear of the electrodes and the accompanying lower wear of fluoroplastic nozzles. For arc extinguishing devices of gas-free autocompression switches with a one-way gas flow, preferential wear of the electrode located downstream of the gas stream is established.

Key words: gas-free switches, arc extinguishing devices, wear resistance of electrodes.

Электротехника, 2025, №6, стр. 72-79

О влиянии геомагнитно-индуцированных токов на энергосистему Республики Алтай и Сибири

УЧАЙКИН Е.О., ГВОЗДАРЕВ А.Ю., КУДРЯВЦЕВ Н.Г., ЯДАГАЕВ Э.Г.

Выполнена оценка перегрузки силовых трансформаторов в энергосистеме Республики

Алтай и Саяно-Шушенской ГЭС в результате действия геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ). Описана установка для измерения ГИТ в энергосистеме Республики Алтай и результаты измерения на ней весной – летом 2024 г. Разработана физико-математическая модель, позволяющая рассчитывать ГИТ по данным магнитной станции «Байгазан». Результаты прямых измерений качественно согласуются с результатами, полученными при моделировании. С помощью модели выполнена теоретическая оценка ГИТ на подстанциях ЛЭП 500 кВ «Саяно-Шушенская ГЭС – ПС Новокузнецкая». Во время самой сильной за 20 лет магнитной бури 10–11 мая 2024 г. расчётные значения ГИТ составили около 100 и 50 А. На основе литературных данных и измерений на макетной установке даны оценки прироста тока холостого хода силовых трансформаторов за счет ГИТ на подстанции «Ининская» в энергосистеме Республики Алтай (7%), «Новокузнецкая» (14 А, 1500%) и «Саяно-Шушенская ГЭС» (20 А, 1000%). Сделан вывод об устойчивости этих энергосистем к этим воздействиям.

Ключевые слова: энергосистема Республики Алтай и Сибири, геомагнитно-индуцированные токи, электрические сети, высоковольтные линии электропередач, силовые трансформаторы, ток холостого хода.

An assessment of the overload of power transformers in the power system of the Altai Republic and the Sayano-Shushenskaya HPP as a result of geomagnetic-induced currents (GIT) has been performed. An installation for measuring GIT in the Altai Republic's energy system and the measurement results on it in the spring and summer of 2024 are described. A physico-mathematical model has been developed that allows calculating GIT based on data from the Baigazan magnetic station. The results of direct measurements are qualitatively consistent with the results obtained during modeling. Using the model, a theoretical assessment of the GIT at the substations of the 500 kV Sayano-Shushenskaya HPP – Novokuznetsk substation was performed. During the strongest magnetic storm in 20 years on May 10-11, 2024, the calculated values of the GIT were about 100 and 50 A. Based on literature data and measurements on a mock-up installation, estimates of the increase in the no-load current of power transformers due to GIT at the Ininskaya substation in the Altai Republic power system (7%), Novokuznetsk (14 A, 1,500%) and Sayano-Shushenskaya HPP (20 A, 1,000%) are given. It is concluded that these power systems are resistant to these impacts.

Key words: power system of the Altai Republic and Siberia, geomagnetically induced

currents, electric networks, high-voltage power transmission lines, power transformers, no-load current.

Электротехника, 2025, №6, стр. 80-81

Авторы номера