

Содержание

Электротехника, 2023, №1, стр.2-9

Об оптимизации магнитной системы дифференциальной передачи ветроагрегата
МОЛОКАНОВ О.Н., РЫЖОВ В.В., КОНЮШЕНКО Е.В., ЗЕНЬКО Е.Д., ОСПИКИН С.В.,
КУРБАТОВ П.А.

Рассмотрены подходы к проектированию магнитной системы электромагнитной дифференциальной передачи ветроагрегата, позволяющие получить высокое внутреннее передаточное отношение или высокий удельный момент. Методом конечных элементов выполнено численное статическое моделирование ветроагрегата мощностью 100 кВт при частоте вращения 50 об/мин. Проведена многомерная параметрическая оптимизация геометрии магнитной системы с целью достижения минимальной цены активных материалов при постоянной тепловой нагрузке. Полученные данные позволили рассчитать предельные удельные показатели материалоемкости оптимизированных устройств, характеризующихся максимальным электромагнитным моментом в единице объема магнитной системы и минимальной стоимостью единицы электромагнитного момента. Выполнено сравнение стоимости активных материалов систем генерации и передачи мощности ветроагрегата на основе электромагнитной дифференциальной передачи и ветровой установки прямого привода.

Ключевые слова: ветроагрегат, магнитная передача, редуктор, мультипликатор, трансмиссия, делитель мощности.

Approaches to the design of a magnetic system of electromagnetic differential transmission of a wind turbine are considered, allowing to obtain a high internal gear ratio or a high specific moment. The finite element method is used to perform numerical static modeling of a device with a power of 100 kW at a rotation speed of 50 rpm. Multidimensional parametric optimization of the geometry of the magnetic system was carried out in order to achieve the minimum price of active materials under constant thermal load. The data obtained made it possible to calculate the maximum specific indicators of the material consumption of optimized devices characterized by the maximum electromagnetic moment per unit volume of the magnetic system and the

minimum cost per unit electromagnetic moment. The comparison of the cost of active materials of the power generation and transmission systems of a wind turbine based on an electromagnetic differential transmission and a direct drive wind turbine is carried out.

Key words: wind turbine, magnetic transmission, gearbox, multiplier, transmission, power divider.

Электротехника, 2023, №1, стр.10-14

Магнитоэлектрический вентильный двигатель с магнитной асимметрией ротора
АФАНАСЬЕВ А.А.

Рассмотрен вентильный двигатель с постоянными магнитами, имеющими неодинаковую намагниченность отдельных полюсов ротора. В таком двигателе магнитная индукция в воздушном зазоре имеет кроме основной гармоники и гармоники низшего порядка. Выполнен анализ индуктивностей взаимной индукции ротора с фазами обмотки статора. Исследованы рабочие свойства вентильного двигателя с магнитной асимметрией ротора на основе его математической модели в координатах d, q , у которой ток статора содержит только поперечную составляющую. В этом случае вентильный двигатель имеет максимальный электромагнитный момент при заданном токе. Показано, что даже при 5%-ном недонамагничивании магнитов одного полюса ротора появляются значительные пульсации тока и электромагнитного момента двигателя.

Ключевые слова: магнитоэлектрический вентильный двигатель, магнитная асимметрия ротора, постоянные магниты, математическая модель, пульсации тока и электромагнитного момента, коэффициент мощности.

A valve motor with permanent magnets having unequal magnetization of the individual poles of the rotor is considered. In such an engine, magnetic induction in the air gap has, in addition to the main harmonic and a lower-order harmonic. The analysis of the inductance of mutual induction of the rotor with the phases of the stator winding is performed. The working properties of a valve motor with magnetic asymmetry of the rotor are investigated on the basis of its mathematical model in coordinates, in which the stator current contains only a transverse component. In this case, the valve motor has a maximum electromagnetic torque at a given current. It is shown that even if the magnetization of the magnets of one pole of the rotor is less

than 5%, significant pulsations of the current and electromagnetic torque of the motor appear.

Key words: magnetoelectric valve motor, magnetic asymmetry of the rotor, permanent magnets, mathematical model, current and electromagnetic moment pulsations, power factor.

Электротехника, 2023, №1, стр.15-22

Контроль сопротивления изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью: обработка данных в устройстве с импульсным тестовым напряжением
МАЛАФЕЕВ С.И., МАЛАФЕЕВ С.С.

Предложен алгоритм обработки данных измерения сопротивления изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью. Рассмотрены особенности непрерывного контроля сопротивления изоляции в электрических сетях с полупроводниковыми преобразователями энергии. Приведено описание технического решения, отвечающего требованиям нормативных документов для горной техники и обеспечивающего повышение быстродействия процедуры контроля сопротивления изоляции и защиты электрооборудования. Алгоритм работы устройства основан на использовании периодического тестового сигнала. Источник тестового напряжения генерирует в сеть переменного тока разнополярные импульсы специальной формы. В течение каждого периода тестового сигнала выполняются две процедуры: заряд ёмкости электрической сети и непосредственное измерение тока утечки в установившемся для постоянного измерительного тока режиме. На основании результатов измерения токов утечки при положительном и отрицательном значениях тестового напряжения определяется сопротивление изоляции, которое используется в схеме защитного отключения. Уменьшение погрешности измерения обеспечивается компенсацией помех при алгебраическом суммировании сигналов, пропорциональных току утечки, но сдвинутых во времени на половину периода тестового сигнала. Сопротивление изоляции вычисляется путем усреднения вычисленного значения сопротивления изоляции на скользящем интервале, равном периоду напряжения контролируемой сети. Усредненный на скользящем интервале сигнал является непрерывным, следовательно, результат измерения также формируется непрерывно. Задержка в определении момента снижения сопротивления изоляции приближенно составляет половину периода тестового напряжения. Непрерывный контроль сопротивления изоляции в электроустановках двойного рода тока служит основой безопасной работы персонала и эксплуатации

оборудования. Приводятся результаты моделирования работы устройства контроля сопротивления изоляции в электрической сети с тиристорными выпрямителями.

Ключевые слова: электрическая сеть с изолированной нейтралью, электрооборудование, сопротивление изоляции, контроль, электробезопасность.

An algorithm for processing insulation resistance measurement data in an electrical network with an isolated neutral is proposed. The features of continuous control of insulation resistance in electrical networks with semiconductor energy converters are considered. The description of a technical solution that meets the requirements of regulatory documents for mining equipment and provides an increase in the speed of the insulation resistance control procedure and protection of electrical equipment. The algorithm of the device is based on the use of a periodic test signal. The test voltage source generates multipolar pulses of a special shape into the AC network. During each period of the test signal, two procedures are performed: charging the capacity of the electrical network and direct measurement of the leakage current in the steady-state mode for a constant measuring current. Based on the results of measuring leakage currents at positive and negative values of the test voltage, the insulation resistance is determined, which is used in the circuit of the protective circuit. The reduction of the measurement error is provided by compensation of interference during the algebraic summation of signals proportional to the leakage current, but shifted in time by half the period of the test signal. The insulation resistance is calculated by averaging the calculated insulation resistance value over a sliding interval equal to the voltage period of the monitored network. The signal averaged over the sliding interval is continuous, therefore, the measurement result is also formed continuously. The delay in determining the moment when the insulation resistance decreases is approximately half of the test voltage period. Continuous monitoring of insulation resistance in electrical installations of a dual type of current serves as the basis for the safe operation of personnel and equipment operation. The results of modeling the operation of an insulation resistance monitoring device in an electrical network with thyristor rectifiers are presented.

Keywords: electrical network with isolated neutral, electrical equipment, insulation resistance, control, electrical safety.

Управление активным выпрямителем напряжения в системе генерирования на основе синхронного генератора с комбинированным возбуждением при переменной частоте вращения вала генератора

ХАРИТОНОВ С.А., ХАРИТОНОВ А.С., САРАХАНОВА Р.Ю., МЕШАЛКИН В.С.

В статье описан способ управления выпрямителем активного напряжения, который сочетает в себе регулирование выходного напряжения постоянного тока и параметрическое регулирование фазы управляющего сигнала при заданной глубине модуляции с нулевым значением реактивного тока. Такое управление возможно в системах электроснабжения на основе синхронного генератора с комбинированным возбуждением и активного выпрямителя напряжения при переменной частоте вращения вала электрической машины, в частности, в авиационных системах электроснабжения. При этом потребление реактивной мощности синхронным генератором сводится к минимуму, повышаются энергоэффективность и массогабаритные показатели всей системы. Алгоритм управления выпрямителем активного напряжения реализован в системе координат, вращающейся с частотой его входного напряжения, при этом стабилизация по входному напряжению при изменении частоты вращения вала генератора достигается параметрическим регулированием тока возбуждения. Положение ротора генератора определяется датчиком положения ротора, расположенным на его валу. Роль буферного реактора выполняют реактивные сопротивления электрической машины. Предложен и исследован алгоритм формирования фазы управляющего сигнала активного выпрямителя напряжения при синхронизации его вращающейся системы координат относительно ЭДС генератора.

Ключевые слова: система электроснабжения, синхронный генератор с комбинированным возбуждением, активный выпрямитель напряжения, энергоэффективность, коэффициент мощности.

The article describes the control method of an active voltage rectifier, which combines the regulation of the DC output voltage and the parametric control of the phase of the control signal at a given modulation depth with a zero value of the reactive current. Such control is possible in power generation systems based on a synchronous generator with combined excitation and an active voltage rectifier at a variable speed of the electric machine shaft, in particular, in aircraft generation systems. At the same time, the consumption of reactive power by the synchronous generator is minimized, energy efficiency and weight and size indicators of the entire system are

improved. The control algorithm for an active voltage rectifier is implemented in a coordinate system rotating with the frequency of its input voltage, while stabilization in terms of the input voltage when the generator shaft speed changes is achieved by parametric control of the excitation current. The position of the generator rotor is determined by the rotor position sensor located on its shaft. The role of the buffer reactor is performed by the reactances of the electrical machine. An algorithm for forming the phase of the control signal of an active voltage rectifier during synchronization of its rotating coordinate system with respect to the generator EMF is proposed and investigated.

Key words: generation system, synchronous generator with combined excitation, active voltage rectifier, energy efficiency, power factor.

Электротехника, 2023, №1, стр.27-34

Применение модельно-ориентированного программирования для управления силовыми транзисторными преобразователями электроприводов
ПОЛЮЩЕНКОВ И.С.

Рассмотрены возможности использования модельно-ориентированного программирования (МОП) для управления трёхфазным мостовым транзисторным преобразователем и преобразователями на основе его схемы в составе электроприводов путём генерирования сигналов с широтно-импульсной модуляцией. Показаны ограничения использования МОП. Рассмотрена модернизация стандартных модельных средств и модельных структур для повышения функциональности и выразительности в зависимости от специфики применения, а также для рационального распределения ресурсов микроконтроллера и своевременного обновления информации в процессе управления. Приведена иллюстрация применения результатов исследования при разработке микропроцессорной системы управления электропривода. Показано расширение её функциональности и улучшение характеристик. Подчёркнута доступность модельно-ориентированного программирования и проведения модификации стандартных модельных средств под конкретные задачи для инженеров-электромехаников, как правило, имеющих ограниченный уровень по применению микропроцессорной техники и технологий программирования. Приведённые материалы могут послужить практическим руководством по модельно-ориентированной разработке.

Ключевые слова: силовой транзисторный преобразователь, широтно-импульсная

модуляция, электропривод, микроконтроллер, микропроцессорное управление, модельно-ориентированное программирование.

The possibilities of using model-oriented programming (MOP) for controlling a three-phase bridge transistor converter and converters based on its circuit as part of electric drives by generating signals with pulse width modulation are considered. The limitations of the use of the MOP are shown. The modernization of standard modeling tools and model structures is considered to increase functionality and expressiveness, depending on the specifics of the application, as well as for the rational allocation of microcontroller resources and timely updating of information in the management process. An illustration of the application of the research results in the development of a microprocessor control system of an electric drive is given. The expansion of its functionality and improvement of its characteristics are shown. The accessibility of model-oriented programming and modification of standard model tools for specific tasks for electrical engineers, who usually have a limited level of application of microprocessor technology and programming technologies, is emphasized. These materials can serve as a practical guide to model-oriented development.

Key words: power transistor converter, pulse width modulation, electric drive, microcontroller, microprocessor control, model-oriented programming.

Электротехника, 2023, №1, стр.35-43

Влияние температурного состояния элементов технологической пушки на работу электронно-оптической системы и параметры электронного пучка

ГОНЧАРОВ А.Л., ХАРИТОНОВ И.А., ЧУЛКОВ И.С., ТИТАРЕВ Е.К., ЩЕРБАКОВ А.В.

Исследовано влияние температурного состояния элементов технологической пушки, их взаимного расположения на работу электронно-оптической системы и параметры генерируемого пучка. Разработана тепловая модель нагрева катодного блока электронной пушки ЭЛА-60Б. Для верификации модели на базе электронно-лучевой установки ЭЛА-15И разработан экспериментальный стенд, позволяющий регистрировать температуру катода и корпуса пушки, а также мощность подогрева катода. В качестве параметров верификации использовались температуры катода и корпуса пушки на стационарном участке, а также температурные зависимости на участке естественного охлаждения катода

и прогрева корпуса пушки. В качестве отладочных узлов модели использовались тепловые контакты между соприкасающимися поверхностями деталей катодного узла. На основе температурных полей рассчитаны деформации катодного узла; для оценки влияния деформаций проведен траекторный анализ с последующим построением вольт-амперной характеристики. Получена реальная вольт-амперная характеристика электронной пушки ЭЛА-60Б. В результате расчета деформаций было установлено, что при нагреве катод выдвигается относительно управляющего электрода, придвигаясь к аноду. Управляющий электрод также удлиняется и сближается с анодом. Траекторный расчет показал, что тепловые деформации ведут к изменению условий работы электронно-оптической линзы. Вольт-амперная характеристика сдвигается вправо, тем самым сдвигая границу открытия пушки, кроссовер пучка опускается ниже к аноду, что в свою очередь ведет к изменению положения фокальной плоскости пучка.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронная пушка, электронный пучок, электронно-оптическая линза, термоэлектронная эмиссия, тепловая деформация, теплопроводность, тепловое излучение, конвекция, численное моделирование.

The influence of the temperature state of the elements of the technological gun, their mutual arrangement on the operation of the electron-optical system and the parameters of the generated beam is investigated. A thermal model of heating the cathode block of the ELA-60B electron gun has been developed. To verify the model, an experimental stand has been developed on the basis of the ELA-15I electron beam installation, which allows recording the temperature of the cathode and the gun body, as well as the cathode heating power. The temperatures of the cathode and the gun body at the stationary site, as well as temperature dependences at the site of natural cooling of the cathode and heating of the gun body were used as verification parameters.

Thermal contacts between the contacting surfaces of the cathode assembly parts were used as debugging nodes of the model. On the basis of temperature fields, deformations of the cathode node were calculated; to assess the effect of deformations, a trajectory analysis was carried out, followed by the construction of a volt-ampere characteristic. The real volt-ampere characteristic of the ELA-60B electron gun is obtained. As a result of the calculation of deformations, it was found that when heated, the cathode is pushed forward relative to the control electrode, moving closer to the anode. The control electrode also extends and approaches the anode. The trajectory calculation showed that thermal deformation leads to a change in the operating conditions of the electron-optical lens. The volt-ampere characteristic shifts to the right, thereby shifting the opening boundary of the gun, the beam crossover drops lower to the anode, which in turn leads

to a change in the position of the focal plane of the beam.

Key words: electron beam welding, electron gun, electron beam, electron-optical lens, thermoelectronic emission, thermal deformation, thermal conductivity, thermal radiation, convection, numerical modeling.

Электротехника, 2023, №1, стр.43-50

Остекловывание радиоактивных отходов методом индукционной плавки в холодном тигле в печи с донным нагревом

ЛОПУХ Д.Б., ВАВИЛОВ А.В., МАРТЫНОВ А.П., СКРИГАН И.Н., ХОРШЕВ А.А.

Выполнено обобщение пилотных разработок экспериментальных печей для индукционной плавки в холодном тигле с донным нагревом с целью остекловывания радиоактивных отходов. Представлена история разработки таких печей, демонстрирующая особенности, преимущества и недостатки их использования. Приведены результаты математического моделирования таких печей. Анализ результатов экспериментальных и расчетных исследований позволяют рекомендовать использование печей с донным нагревом для остекловывания радиоактивных отходов в качестве инновационных разработок. Показаны направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: печи с донным нагревом, индукционная плавка в холодном тигле, остекловывание радиоактивных отходов, математическое моделирование, обзор.

The generalization of pilot developments of experimental furnaces for induction melting in a cold crucible with bottom heating for the purpose of vitrification of radioactive waste has been carried out. The history of the development of such furnaces is presented, demonstrating the features, advantages and disadvantages of their use. The results of mathematical modeling of such furnaces are presented. Analysis of the results of experimental and computational studies allow us to recommend the use of bottom-heated furnaces for vitrification of radioactive waste as innovative developments. The directions of further research are shown.

Key words: bottom-heated furnaces, induction melting in a cold crucible, vitrification of radioactive waste, mathematical modeling, review.

Электротехника, 2023, №1, стр.50-55

Особенности переходных восстанавливающихся напряжений при отключении коротких замыканий в кабельных линиях высоковольтных электрических сетей
ГУСЕВ О.Ю., ГУСЕВ Ю.П., ПОСОХОВ Н.О.

Исследованы переходные восстанавливающиеся напряжения (ПВН) между контактами высоковольтных выключателей при отключении коротких замыканий (КЗ). Рассмотрено влияние междуфазной емкости, емкости электрооборудования подстанции на землю со стороны сетевого источника и удаленности короткого замыкания от выключателя на воздушных (ВЛ) и кабельных линиях (КЛ). Установлено, что упрощенные методы расчета ПВН имеют неприемлемо большие погрешности; при проверке выключателей на отключающую способность следует использовать методы, предусматривающие цепочечные схемы замещения линий, с частотно зависимыми параметрами элементов. Показано, что скорость нарастания ПВН при однофазных КЗ на КЛ значительно меньше, чем на ВЛ, но пиковые значения ПВН на КЛ выше. Рекомендовано при реконструкции электрических сетей, сопровождающейся заменой воздушных линий на кабельные, проверять отключающую способность выключателей с учетом параметров ПВН.

Ключевые слова: кабельные линии, воздушные линии, однофазные короткие замыкания, переходные восстанавливающиеся напряжения, высоковольтные выключатели.

Transient regenerating voltages (TRV) between the contacts of high-voltage switches when short circuits (short circuit) are switched off are investigated. The influence of the phase-to-phase capacity, the capacity of substation electrical equipment on the ground from the network source and the distance of the short circuit from the switch on overhead lines (OL) and cable lines (CL) is considered. It has been established that simplified methods for calculating TRV have unacceptably large errors; when checking switches for breaking capacity, methods should be used that provide for chain replacement circuits of lines with frequency-dependent parameters of elements. It is shown that the rate of increase of TRV at single-phase short circuit on the CL is significantly less than on the overhead line, but the peak values of TRV on the CL are higher. It is recommended during the reconstruction of electrical networks, accompanied by the replacement of overhead lines with cable lines, to check the breaking capacity of switches taking into account the parameters of the TRV.

Key words: cable lines, overhead lines, single-phase short circuits, transient regenerating voltages, high-voltage switches.

Электротехника, 2023, №1, стр.55-60

Анализ энергетических процессов, предшествующих резонансу в электрической цепи
ОСТРЕЙКО В.Н.

Показано, что при подключении электрической цепи R, L, C к источнику синусоидального напряжения, индуктивность L и ёмкость C во время переходного процесса накапливают необходимую для резонанса магнитную и электрическую энергии, всегда получая при этом некоторые их количества из внешнего пространства. В итоге окончательные энергии индуктивности и ёмкости становятся одинаковыми, соответствуя известному из классической теории значению единой энергии последующего установившегося синусоидального (резонансного) процесса. Поэтому без энергетической связи индуктивности и ёмкости с пространством электрический резонанс невозможен.

Ключевые слова: электрическая цепь, энергетические процессы, резонанс.

It is shown that when an electrical circuit R, L, C is connected to a sinusoidal voltage source, the inductance L and capacitance C during the transient process accumulate the magnetic and electrical energy necessary for resonance, always receiving some of their amounts from the external space. As a result, the final inductance and capacitance energies become the same, corresponding to the value of the unified energy of the subsequent steady-state sinusoidal (resonant) process known from classical theory. Therefore, without an energy coupling of inductance and capacitance with space, electric resonance is impossible.

Key words: electric circuit, energy processes, resonance.

Электротехника, 2023, №1, стр.61-62

Авторы номера

Электротехника, 2023, №1, стр.63-63

**XIX международная конференция «Электромеханика, электротехнологии,
электротехнические материалы и компоненты» (МКЭЭЭ-2022)**

Электротехника, 2023, №1, стр.64-64

**Станислав Иванович Гусев
(К 75-летию со дня рождения)**

Электротехника, 2023, №1, стр.65-65

**Михаил Григорьевич Юньков
(К 100-летию со дня рождения)**