

Применение тепловизионной техники в электронно-лучевой обработке металлов (Обзор)

УСОВ Д.М., ЩЕРБАКОВ А.В., ГАПОНОВА Д.А., РОДЯКИНА Р.В., ГОНЧАРОВ А.Л.

Определены диапазоны изменения основных параметров технологических процессов электронно-лучевой обработки материалов, включая плавку, поверхностную обработку, абляцию, сварку и аддитивное формообразование; выделены параметры, необходимые для выбора тепловизионного оборудования с целью мониторинга области воздействия электронного луча на обрабатываемый материал. Дана классификация инфракрасных камер различных спектральных диапазонов, включая двухспектральные и многоспектральные системы, выделены области их применения и температурные диапазоны. Выполнен обзор методов тепловизионного контроля процессов нагрева с использованием электронного луча, показаны основные тенденции применения инфракрасной техники для решения задач мониторинга и управления параметрами электронно-лучевой обработки материалов.

Ключевые слова: электронно-лучевые технологии обработки металлов, тепловизионная техника, контроль технологических процессов, сварка, плавка, поверхностная обработка, аддитивные технологии, обзор.

The ranges of changes in the main parameters of technological processes of electron beam processing of materials, including melting, surface treatment, ablation, welding and additive shaping, are determined; the parameters necessary for the selection of thermal imaging equipment in order to monitor the area of impact of the electron beam on the processed material are highlighted. The classification of infrared cameras of various spectral ranges, including two-spectral and multispectral systems, is given, their fields of application and temperature ranges are highlighted. An overview of methods of thermal imaging control of heating processes using an electron beam is performed, and the main trends in the use of infrared technology for solving problems of monitoring and controlling the parameters of

electron beam processing of materials are shown.

Key words: electron beam metalworking technologies, thermal imaging technology, process control, welding, melting, surface treatment, additive technologies, overview.

Электротехника, 2026, №2, стр. 18-28

Методика расчёта характеристик электромагнитного взаимодействия индуктора с железобетонным изделием. Теоретическая часть

ФЕДОСОВ С.В., СОКОЛОВ А.М., ШАДРУНОВ Ю.В., ДЬЯЧКОВ А.А., ШАДРИКОВ Т.Е., СМИРНОВ А.О.

Представлена методика расчёта характеристик электромагнитного взаимодействия индукторов с железобетонными изделиями при электротепловой обработке токами повышенной частоты. Предложена математическая модель, позволяющая определить токи, напряжения, передаваемую мощность и КПД для индукторов круглой и прямоугольной формы. Модель основана на схемах замещения и уравнениях цепи переменного тока, модель учитывает влияние резонансных ёмкостей, частоты питающего напряжения, а также наличие арматуры в бетоне. Выполнено программное моделирование в среде MATLAB, продемонстрировавшее преимущества резонансных схем подключения индукторов и их эффективность для армированных и неармированных изделий. Результаты моделирования подтверждают возможность применения индукционного метода для электротепловой обработки с использованием в качестве источника питания транзисторных преобразователей, обеспечивающих высокий КПД (до 97–98%). Отмечена необходимость экспериментальной проверки модели для дальнейшего внедрения технологии в практику.

Ключевые слова: электротепловая обработка железобетонных изделий, электромагнитный индуктор, характеристики электромагнитного взаимодействия индукторов с железобетонными изделиями, математическое моделирование, MATLAB.

A method for calculating the characteristics of the electromagnetic interaction of inductors with reinforced concrete products during thermal treatment with high-frequency currents is presented. A mathematical model is proposed that makes it possible to determine currents, voltages, transmitted power and efficiency for round and rectangular inductors. The model is

based on substitution schemes and equations of an alternating current circuit, the model takes into account the influence of resonant capacitances, the frequency of the supply voltage, as well as the presence of reinforcement in concrete. Software modeling was performed in the MATLAB environment, which demonstrated the advantages of resonant circuits for connecting inductors and their effectiveness for reinforced and non-reinforced products. The simulation results confirm the possibility of using the induction method for electrothermal treatment using transistor converters as a power source, providing high efficiency (up to 97-98%). The necessity of experimental verification of the model for further implementation of the technology in practice is noted.

Key words: electrothermal treatment of reinforced concrete products, electromagnetic inductor, characteristics of electromagnetic interaction of inductors with reinforced concrete products, mathematical modeling, MATLAB.

Электротехника, 2026, №2, стр. 28-40

Основные требования к системе мониторинга геоиндуцированных токов в электрической сети высокого напряжения с глухозаземленной нейтралью
КУВШИНОВ А.А., ВАХНИНА В.В., ЧЕРНЕНКО А.Н., ФЕДЯЙ О.В., ХРЕННИКОВ А.Ю.

Выполнен анализ временного профиля геоиндуцированного тока, который представляет собой непрерывную последовательность однополярных выбросов различной длительности и амплитуды и позволяет получить предварительную оценку продолжительности состояния насыщения магнитной системы силового трансформатора за время действия геомагнитной бури. Показано, что для оценки устойчивости электрической сети к воздействию геомагнитных бурь достаточно осуществлять мониторинг геоиндуцированных токов в критических узлах, количество которых определяется топологией электрической сети, пространственной ориентацией воздушных линий электропередачи и наличием в этих узлах силовых трансформаторов с броневого или бронестержневой магнитной системой. Показано, что для мониторинга геоиндуцированных токов необходимо использовать измерительный преобразователь тока прямого усиления с датчиком Холла. Предел преобразования измерительного преобразователя необходимо выбирать с учетом ожидаемых длительно протекающих геоиндуцированных токов и уровня гармоник нулевой последовательности в составе

тока нейтрали с учетом показателей качества электроэнергии в узле подключения силового трансформатора.

Ключевые слова: электрическая сеть высокого напряжения, критические узлы электрической сети, силовой трансформатор, глухозаземленная нейтраль, геоиндуцированный ток, топология линий электропередачи, измерительный преобразователь прямого усиления, датчик Холла.

The time profile of the geinduced current is analyzed, which is a continuous sequence of unipolar emissions of various durations and amplitudes and allows us to obtain a preliminary estimate of the duration of the saturation state of the magnetic system of a power transformer during the action of a geomagnetic storm. It is shown that in order to assess the stability of an electrical network to the effects of geomagnetic storms, it is sufficient to monitor geinduced currents in critical nodes, the number of which is determined by the topology of the electrical network, the spatial orientation of overhead power lines and the presence in these nodes of power transformers with an armored or armored magnetic system. It is shown that to monitor geinduced currents, it is necessary to use a direct-gain current measuring converter with a Hall sensor. The conversion limit of the measuring transducer must be selected taking into account the expected long-term geinduced currents and the harmonic level of the zero sequence in the neutral current, taking into account the quality indicators of the electric power in the connection node of the power transformer.

Key words: high voltage electrical network, critical nodes of the electrical network, power transformer, dead-earth neutral, geinduced current, topology of power transmission lines, direct gain measuring transducer, Hall sensor.

Электротехника, 2026, №2, стр. 41-48

Тепловой поток в профилированных тоководах криогенных электротехнических устройств

БУЯНОВ Ю.Л.

Рассмотрено уравнение теплового баланса в криотоковводах постоянного и переменного поперечного сечений, охлаждаемых парами жидкого азота, с целью определения теплового потока в низкотемпературную зону и сопоставления

оптимальных геометрических характеристик криотоковводов при изменении тока. В рассматриваемой математической модели изменение площади поперечного сечения вдоль оси токоввода представлено гладкой линейной функцией, позволяющей выполнить интегрирование дифференциального уравнения теплового баланса. На примере токовводов с постоянной и переменной площадями сечений, характеризующихся определённым материалом, охлаждением и формой вводов, определены значения теплового потока к криоагенту.

Ключевые слова: криогенные устройства, токовводы, переменное поперечное сечение, тепловой поток, расчет, математическая модель.

The equation of the thermal balance in cryotoxins of constant and variable cross-sections cooled by liquid nitrogen vapor is considered in order to determine the heat flow into the low-temperature zone and compare the optimal geometric characteristics of cryotoxins with a change in current. In the mathematical model under consideration, the change in the cross-sectional area along the axis of the current supply is represented by a smooth linear function that allows the integration of the differential equation of thermal balance. Using the example of current leads with constant and variable cross-sectional areas characterized by a certain material, cooling and shape of the inputs, the values of the heat flow to the cryoagent are determined.

Key words: cryogenic devices, current leads, variable cross-section, heat flow, calculation, mathematical model.

Электротехника, 2026, №2, стр. 49-60

Способы бандажирования ротора для снижения потерь на индуцированные токи и нагрев постоянных магнитов мощных высокооборотных синхронных генераторах
КИРЯКИН А.А., ЩЕТИНИН Е.В.

Предложен способ уменьшения потерь на индуцированные токи и нагрев постоянных магнитов в высокооборотных роторах мощных синхронных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением. Для защиты постоянных магнитов от центробежных сил предложена трехслойная система бандажа, обеспечивающая экранирование магнитов от индуцированных токов, удержание магнитов с помощью

основного бандажа из титанового сплава VT22 и дополнительного электротеплоизоляционного высокопрочного бандажа из углеродной ленты, снижающего нагрев магнитов. Расчет электромагнитной задачи и потерь на индуцированные токи выполнен методом конечных элементов в программном комплексе COMSOLMultiphysics 6.2. Расчет нагрева магнитов при разных способах бандажирования выполнен с использованием предлагаемой аналитической одномерной модели нагрева ротора методом эквивалентных тепловых схем замещения. Проведен анализ нагрева ротора от потерь на индуцированные токи при различных способах бандажирования, включающих классический способ, а также современные подходы. Результаты аналитического расчета двухмерной задачи нагрева ротора сравниваются с результатами численного моделирования.

Ключевые слова: высокооборотный синхронный генератор, ротор с постоянными магнитами, бандаж ротора, индуцированные токи, нагрев ротора, метод эквивалентных тепловых схем, численное моделирование электромагнитной задачи, COMSOLMultiphysics.

A method is proposed to reduce losses due to induced currents and heating of permanent magnets in high-speed rotors of powerful synchronous machines with magnetoelectric excitation. To protect permanent magnets from centrifugal forces, a three-layer bandage system is proposed, which provides shielding of magnets from induced currents, magnetic retention using a main bandage made of VT22 titanium alloy and an additional high-strength electrical insulation bandage made of carbon tape, which reduces the heating of the magnets. The calculation of the electromagnetic problem and losses for induced currents was performed using the finite element method in the COMSOLMultiphysics 6.2 software package. The calculation of magnet heating for various banding methods was performed using the proposed analytical one-dimensional model of rotor heating using equivalent thermal substitution schemes. The analysis of rotor heating from losses to induced currents in various methods of banding, including the classical method, as well as modern approaches, is carried out. The results of the analytical calculation of the two-dimensional rotor heating problem are compared with the results of numerical simulation.

Key words: high-speed synchronous generator, permanent magnet rotor, rotor brace, induced currents, rotor heating, method of equivalent thermal circuits, numerical simulation of electromagnetic problem, COMSOLMultiphysics.

Влияние несинусоидальности потребляемого тока на коэффициент полезного действия синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов ротора

ВЫРЫХАНОВ Д.А.

Предложена математическая модель, описывающая влияние высших гармоник тока, потребляемого синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов, на коэффициент полезного действия. В основе методики – определение механической мощности, развиваемой двигателем, через разность механических мощностей, развиваемых при протекании основной и высшими гармониками питающего тока. Дана численная оценка этих составляющих механической мощности для образцов двигателей по результатам анализа их характеристик, представленных в каталоге производителя. Обоснованы направления повышения коэффициента полезного действия рассматриваемых конструкций двигателей, основным из которых является обеспечение синусоидальности питающего тока, что согласуется с известными положениями.

Ключевые слова: синхронный электрический двигатель, механическая мощность, коэффициент полезного действия, напряжение питания, гармонические составляющие.

A mathematical model is proposed describing the effect of the higher harmonics of the current consumed by a permanent magnet-powered synchronous motor on the efficiency. The technique is based on the determination of the mechanical power developed by the motor through the difference in mechanical power developed during the flow of the main and higher harmonics of the supply current. A numerical estimate of these components of mechanical power for engine samples is given based on the results of an analysis of their characteristics presented in the manufacturer's catalog. The directions of increasing the efficiency of the considered motor designs are substantiated, the main of which is to ensure the sinusoidal nature of the supply current, which is consistent with the known provisions.

Key words: synchronous electric motor, mechanical power, efficiency, supply voltage, harmonic components.

Сравнительный анализ и выбор параметров базовых структур CL-фильтров инвертора тока в составе сетевого регулятора на основе индуктивного накопителя энергии

ЛЕПАНОВ М.Г., КИСЕЛЕВ М.Г., КУРБАТОВА Е.П., КОЧНЕВ В.А.

Рассмотрено устройство регулирования активной и реактивной мощности на основе трехфазного преобразователя тока (инвертора тока) с выходным CL-фильтром (сетевым регулятором). Основное внимание уделено сравнению характеристик фильтров, а также влиянию параметров фильтра на ток, генерируемый регулятором. Выполнен анализ двух схем фильтров, отличающихся способом подключения демпфирующего резистора. Предложена методика определения параметров элементов выходного фильтра, в схеме которого резистор соединяется параллельно с дросселем. Результаты расчета параметров фильтра проверены моделированием устройства в программе SimInTech.

Ключевые слова: преобразователь тока, инвертор тока, сетевой регулятор, индуктивный накопитель, широтно-импульсная модуляция.

A device for regulating active and reactive power based on a three-phase current converter (current inverter) with an output CL filter (mains regulator) is considered. The main focus is on comparing filter characteristics, as well as the effect of filter parameters on the current generated by the regulator. The analysis of two filter circuits has been performed, which differ in the method of connecting a damping resistor. A method is proposed for determining the parameters of the output filter elements, in which the resistor is connected in parallel with the choke. The results of calculating the filter parameters have been verified by SimInTech device simulation.

Key words: current converter, current inverter, mains regulator, inductive storage, pulse width modulation.

Совершенствование автономной системы электроснабжения пассажирского

вагона

БУГЛАЕВ Н.А., ФЕДЯЕВА Г.А., ИНЬКОВ Ю.М., ВАСИЛЬЕВА Ю.О.

Для системы автономного электроснабжения пассажирского вагона рассмотрено применение фотоэлектрических панелей и суперконденсатора с целью предотвращения глубокой разрядки и снижения колебаний мощности аккумуляторной батареи.

Приведены электрическая схема подключения суперконденсатора и солнечной панели, методика расчёта некомпенсированной мощности аккумуляторной батареи и принцип её компенсации суперконденсатором на основе управления транзисторами двунаправленного понижающе-повышающего преобразователя. Разработан алгоритм отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрической панели с использованием повышающего полупроводникового преобразователя. Выполнены расчёт элементов схемы с применением отечественных компонентов и проверка её работоспособности на базе компьютерного моделирования.

Ключевые слова: пассажирский вагон, колебания мощности аккумуляторной батареи, суперконденсатор, фотоэлектрические панели, отслеживание точки максимальной мощности, компьютерное моделирование.

For the autonomous power supply system of a passenger car, the use of photovoltaic panels and a supercapacitor is considered in order to prevent deep discharge and reduce fluctuations in battery power. An electrical connection diagram of a supercapacitor and a solar panel, a method for calculating the uncompensated battery power and the principle of its compensation by a supercapacitor based on transistor control of a bidirectional step-down converter are presented. An algorithm for tracking the maximum power point of a photovoltaic panel using a step-up semiconductor converter has been developed. The calculation of the circuit elements using domestic components and verification of its operability based on computer modeling are performed.

Key words: passenger car, fluctuations in battery power, supercapacitor, photovoltaic panels, maximum power point tracking, computer simulation.