

Содержание

Электротехника, 2025, №7, стр. 2-7

Эффективность эксплуатации дуговых сталеплавильных печей в литейных производствах

АЛИФЕРОВ А.И., ГОРЕВА Л.П., БИКЕЕВ Р.А.

В литейных цехах многих машиностроительных предприятий эксплуатируются дуговые сталеплавильные печи (ДСП) малой емкости. Режим их работы и особенности технологии плавки диктуют подходы к решению вопросов эффективности их эксплуатации, отличные от технических и технологических приемов при эксплуатации дуговых сталеплавильных печей большой емкости на металлургических комбинатах. Однако базовым для тех и других является выбор оптимального электрического режима и согласование электрических параметров печи и источника питания – печного трансформатора – на основе электрических и рабочих характеристик печи. Существенным отличием ДСП малой емкости является посменный режим работы. Это приводит к существенной и переменной от плавки к плавке доле расходов энергии на аккумуляцию тепла футеровкой, что не позволяет добиваться в литейном производстве удельного расхода электроэнергии, соответствующего ГОСТ. Рассмотрены проблемы повышения энергоэффективности работы ДСП малой емкости в литейных производствах.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, литейное производство, энергетическая эффективность.

In the foundries of many machine-building enterprises, low-capacity double steelmaking furnaces (chipboard) are operated. The mode of their operation and the specifics of melting technology dictate approaches to solving issues of their operational efficiency, which differ from the technical and technological methods used in the operation of high-capacity arc steel melting furnaces at metallurgical plants. However, the basic principle for both is to choose the optimal electrical mode and coordinate the electrical parameters of the furnace and the power source, the furnace transformer, based on the electrical and operating characteristics of the

furnace. A significant difference between low-capacity chipboard is the shift mode of operation. This leads to a significant and variable proportion of energy consumption from melting to melting for heat storage by lining, which makes it impossible to achieve specific energy consumption in the foundry in accordance with GOST. The problems of increasing the energy efficiency of small-capacity chipboard in foundries are considered.

Key words: arc steelmaking furnace, foundry, energy efficiency.

Электротехника, 2025, №7, стр. 8-14

Эксплуатационная асимметрия вторичного токоподвода дуговой сталеплавильной печи сверхвысокой мощности

АЛИФЕРОВ А.И., ГОРЕВА Л.П., БИКЕЕВ Р.А.

При проектировании дуговой сталеплавильной печи (ДСП) важно обеспечить симметрию индуктивного сопротивления ее вторичного токоподвода. Для этого используют такой конструктивный прием, как триангулирование: на каждом функциональном участке вторичного токоподвода стараются расположить оси фаз в перпендикулярном сечении по сторонам равностороннего треугольника. Однако при эксплуатации печи зачастую заложенная при проектировании симметрия нарушается. Основной причиной является несвоевременный перепуск электродов при их неодинаковом расходе по фазам или вследствие облома электрода. В статье исследуются границы эксплуатационной асимметрии индуктивного сопротивления при разных конструкциях вторичного токоподвода и разных вариантах отклонения длин электродов от симметрии, возможных при эксплуатации ДСП.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, вторичный токоподвод, индуктивное сопротивление, эксплуатационная асимметрия.

Operational asymmetry of the secondary current supply of an ultra-high arc steelmaking furnace When designing an arc steelmaking furnace (chipboard), it is important to ensure the symmetry of the inductive resistance of its secondary current supply. For this purpose, such a constructive technique as triangulation is used: at each functional section of the secondary current supply, they try to arrange the phase axes in a perpendicular section along the sides of an equilateral triangle. However, during the operation of the furnace, the symmetry laid down

in the design is often violated. The main reason is the untimely bypass of the electrodes with their unequal phase flow or due to electrode breakage. The article examines the limits of the operational asymmetry of inductive resistance for different designs of secondary current supply and different variations of electrode lengths from symmetry, possible during the operation of chipboard.

Key words: arc steelmaking furnace, secondary current supply, inductive resistance, operational asymmetry.

Электротехника, 2025, №7, стр. 15-20

Динамическая модель синхронного электромагнитного ударного узла со свободным выбегом бойка

НЕЙМАН Л.А, НЕЙМАН В.Ю.

Рассмотрен электромагнитный ударный узел, получающий питание от источника напряжения промышленной частоты, в котором в качестве эффективной меры повышения энергии удара применяется рабочий цикл со свободным выбегом бойка. Разработана имитационная динамическая модель синхронного электромагнитного ударного узла с двухсторонним свободным выбегом бойка. Модель может применяться для анализа электромеханических процессов, учитывающих деформацию упругих связей, силовые и ударные взаимодействия элементов конструкции механической колебательной системы. Рассмотрен пример динамического расчета в виде временных диаграмм, отражающих рабочий процесс ударного узла с тремя степенями свободы механической системы. Основные результаты и выводы получены с помощью имитационного моделирования в программе MATLAB Simulink с построением структурной схемы и предварительным расчетом магнитного поля. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных указывает на достаточную для практики точность при использовании созданной модели.

Ключевые слова: электромагнитный ударный узел, электромеханические процессы, энергия и частота ударов, свободный выбег бойка, динамическая модель, имитационное моделирование.

An electromagnetic shock unit powered by an industrial frequency voltage source is considered, in which a duty cycle with a free-running striker is used as an effective measure to increase the impact energy. A dynamic simulation model of a synchronous electromagnetic shock unit with a two-way free-running striker has been developed. The model can be used to analyze electromechanical processes that take into account the deformation of elastic bonds, force and shock interactions of structural elements of a mechanical oscillatory system. An example of dynamic calculation in the form of time diagrams reflecting the working process of an impact unit with three degrees of freedom of a mechanical system is considered. The main results and conclusions were obtained using simulation modeling in the MATLAB Simulink program with the construction of a block diagram and preliminary calculation of the magnetic field. A comparison of the calculated and experimental data indicates sufficient accuracy for practice when using the created model.

Key words: electromagnetic shock unit, electromechanical processes, energy and frequency of impacts, free run of the striker, dynamic model, simulation modeling.

Электротехника, 2025, №7, стр. 21-24

Электромагнитный момент беспазового двигателя с постоянными магнитами и дробными катушечными обмотками

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

Статья является продолжением представленной ранее работы, в которой была предложена аналитическая модель беспазовых электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов (БЭМППМ), позволяющая быстро получить распределение магнитного поля в электрической машине. Приводится выражение для расчёта электромагнитного момента в БЭМППМ, опирающееся на распределение магнитного поля, высокая степень точности которого была обоснована путём сравнения с результатами численного моделирования.

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

The article is a continuation of the work presented earlier, in which an analytical model of phase-free electric machines with permanent magnet excitation (BEMPPM) was proposed,

which makes it possible to quickly obtain the distribution of the magnetic field in an electric machine. An expression is given for calculating the electromagnetic moment in the BUMP, based on the distribution of the magnetic field, the high degree of accuracy of which was justified by comparison with the results of numerical modeling.

Key words: phase-free electric machines, magnetoelectric excitation, magnetic field, electromagnetic moment, fractional windings.

Электротехника, 2025, №7, стр. 25-30

Добавочные потери в элементах конструкции модульных синхронных машин с постоянными магнитами

ЖИЛИН О.А., ПРИСТУП А.Г., МАЛОМОШНОВ Н.К.

В статье исследованы добавочные потери от вихревых токов, возникающие в массивных ферромагнитных прижимных элементах статора синхронной машины с постоянными магнитами и модульной конструкцией. На основе численного моделирования в среде AnsysMaxwell 3D выполнен анализ влияния частоты и амплитуды пульсаций магнитной индукции, а также геометрических параметров прижимов на потери в них. Проведено сравнение различных методов снижения потерь на вихревые токи в прижимных элементах.

Ключевые слова: электрическая машина с постоянными магнитами, дробная зубцовая обмотка, модульный статор, потери от вихревых токов, прижим сердечника, П-образный модуль.

The paper investigates additional eddy current losses occurring in massive ferromagnetic clamping elements of the stator in a permanent magnet synchronous machine with a modular design. Based on numerical modeling in Ansys Maxwell 3D, the influence of the frequency and amplitude of magnetic flux density pulsations, as well as the geometric parameters of the clamps on losses in them was analyzed. Various methods for reducing eddy current losses in the clamping elements were compared.

Key words: permanent magnet electric machine, concentrated winding, modular stator, eddy current losses, core clamp, U-shaped module.

Пересчет рабочих характеристик жидкостной системы охлаждения преобразователя частоты при изменении вида теплоносителя

ДОМАХИН Е.А., СИДОРОВ Г.С., КОТИН Д.А., ПОПОВ Н.С., ВИЛЬБЕРГЕР М.Е.

Представлена имитационная модель жидкостной системы охлаждения для преобразователей частоты средней и высокой мощности с применением калорифера в качестве теплообменного аппарата. Выполнен пересчет рабочих характеристик теплообменного аппарата и рабочих характеристик системы охлаждения при изменении вида теплоносителя. Погрешность разработанной модели по результатам расчета температуры воды составила 4,96%, температуры воздуха – 5,25%.

Предложенный подход может быть применен для пересчета характеристик системы охлаждения на другие концентрации водных растворов этилен- или пропиленгликоля, а также на другие теплоносители.

Ключевые слова: высоковольтный преобразователь частоты, преобразователь частоты большой мощности, жидкостная система охлаждения, теплообменные аппараты, теплоноситель, рабочие характеристики, имитационная модель, погрешность расчета.

A simulation model of a liquid cooling system for medium and high power frequency converters using a heater as a heat exchanger is presented. The working characteristics of the heat exchanger and the working characteristics of the cooling system are recalculated when the type of coolant changes. The error of the developed model based on the calculation of water temperature was 4.96%, air temperature – 5.25%. The proposed approach can be applied to recalculate the characteristics of the cooling system for other concentrations of aqueous solutions of ethylene or propylene glycol, as well as for other coolants.

Key words: high-voltage frequency converter, high-power frequency converter, liquid cooling system, heat exchangers, coolant, operating characteristics, simulation model, calculation error.

Моделирование асинхронных двигателей с преобразователем частоты

ПЕРСОВА М.Г., СОЛОВЕЙЧИК Ю.Г., ТЕМЛЯКОВА З.С., ГРЕЧКИН В.В.,
ТЕМЛЯКОВ А.А.

Работа посвящена численному моделированию асинхронных электрических двигателей с преобразователем частоты. Рассмотрены возможности конечно-элементного моделирования электромагнитного поля в объеме электрического двигателя, когда совместно с полем вычисляются значения токов в обмотках статора и ротора, электромагнитные силы и в соответствии с ними и нагрузкой двигателя определяются повороты ротора. Предложенные подходы реализованы в программной системе, которая, по сути, создает цифровой двойник электрической машины, позволяющий не только улучшать конструкцию электрической машины, но и учитывать величину и форму напряжения, подаваемого на двигатель. В качестве примеров рассматриваются две конструкции асинхронных электродвигателей различной мощности с одной и двумя белыми клетками на роторе. Выполнено моделирование работы двигателей при различной нагрузке и для различных режимов пуска: с постоянной и изменяющейся частотой. Хорошая точность расчетов подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными в установившихся после разгона режимах.

Представленная программная система позволит моделировать различные конструкции асинхронных двигателей и на основе результатов моделирования выбирать наиболее подходящие электрические машины и режимы управления ими для минимизации потерь и пусковых токов в зависимости от технических условий функционирования электропривода: требованиям к нагрузкам, времени разгона и т.д.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, конечно-элементное моделирование, электромагнитное поле.

The paper is devoted to the numerical simulation of asynchronous electric motors with a frequency converter. The possibilities of finite element modeling of the electromagnetic field in the volume of an electric motor are considered, when the values of currents in the stator and rotor windings, electromagnetic forces are calculated together with the field, and the rotations of the rotor are determined in accordance with them and the load of the motor. The proposed approaches are implemented in a software system that, in fact, creates a digital twin of an electric machine, allowing not only to improve the design of the electric machine, but also to take into account the magnitude and shape of the voltage applied to the motor. Two

designs of asynchronous electric motors of different power with one and two squirrel cages on the rotor are considered as examples. Simulation of the operation of engines at different loads and for different start-up modes has been performed.: with a constant and changing frequency. The good accuracy of the calculations is confirmed by comparison with experimental data in the modes established after acceleration. The presented software system will make it possible to simulate various designs of asynchronous motors and, based on the simulation results, select the most suitable electrical machines and their control modes to minimize losses and inrush currents, depending on the technical conditions of operation of the electric drive: load requirements, acceleration time, etc.

Key words: asynchronous motor, frequency converter, finite element modeling, electromagnetic field.

Электротехника, 2025, №7, стр. 45-52

Расчет и сравнение нагрузки блока накопителей различной энергоемкости электромобиля на базе ездового цикла WLTC

ШАБАЛИН Р.В., ШТАНГ А.А., ЛАТЫШЕВ Р.Н., СИНГИЗИН И.И., АНДРИЯШИН С.Н.

В условиях эксплуатации электромобилей, характеризующейся нестабильными нагрузками, частыми торможениями и разгонами, оптимизация тягового привода имеет решающее значение для повышения общей энергоэффективности электротранспорта и увеличения запаса хода. Современные компоненты и передовые технологии, такие, как новые материалы и интеллектуальные системы управления, играют важную роль для достижения этих целей. В статье на базе ездового цикла рассматривается разработка эффективной силовой энергоустановки электромобиля. В качестве эталона для определения нагрузок и условий эксплуатации используется глобальный цикл вождения WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle). Был выполнен расчет нагрузки блока аккумуляторной батареи; на основе расчетов проведены сравнение и выбор наиболее эффективного накопителя при эксплуатации электромобиля на основе цикла WLTC.

Ключевые слова: электромобиль, силовая энергоустановка, ездовой цикл WLTC, накопитель, энергоёмкость.

In electric vehicle operating conditions characterized by unstable loads, frequent braking and acceleration, optimization of the traction drive is crucial to improve the overall energy efficiency of electric vehicles and increase power reserve. Modern components and advanced technologies such as new materials and intelligent control systems play an important role in achieving these goals. The article discusses the development of an efficient electric vehicle power plant based on the driving cycle. The WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle) global driving Cycle is used as a reference for determining loads and operating conditions. The load of the battery pack was calculated; based on the calculations, a comparison and selection of the most efficient storage device were carried out during operation of an electric vehicle based on the WLTC cycle.

Key words: electric vehicle, power plant, WLTC driving cycle, storage, energy intensity.

Электротехника, 2025, №7, стр. 53-61

Оценка энергетической эффективности активных балансиров литиевых аккумуляторов

МЯТЕЖ С.В., МЕНЬЩИКОВ А.В., АБРАМОВ Е.Ю., ЛАТЫШЕВ Р.Н., ЧЕРНОВ А.А.

Аналитическим путем и средствами имитационного моделирования исследована работа балансиров, предназначенных для выравнивания зарядов между ячейками аккумуляторной батареи. Получены расчетные выражения, характеризующие энергетическую эффективность активных балансиров, использующих для переноса зарядов емкостные и индуктивные элементы. Показано, что начальное значение коэффициента полезного действия балансира с ёмкостными элементами с учетом допустимых разбросов напряжений литий-ионных ячеек аккумуляторной батареи не превосходит 76% и при выравнивании этих напряжений будет плавно увеличиваться. Наилучшими показателями для выравнивания зарядов между ячейками аккумуляторной батареи обладает активный балансир, использующий для переноса зарядов индуктивные элементы. Его коэффициент полезного действия в меньшей степени зависит от неравномерности распределения зарядов в ячейках аккумуляторной батареи и во время работы может достигать 95% и выше, что с учетом принятого допустимого разброса напряжений между этими ячейками позволяет экономить до 26% электрической энергии, что особенно актуально для энергосбережения при использовании аккумуляторных батарей большой ёмкости.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, ячейка, активный балансир, выравнивание заряда, реактивные элементы, энергетическая эффективность, коэффициент полезного действия.

The work of balancers designed to equalize charges between battery cells has been investigated analytically and by means of simulation modeling. Calculated expressions characterizing the energy efficiency of active balancers using capacitive and inductive elements for charge transfer are obtained. It is shown that the initial value of the efficiency of a balancer with capacitive elements, taking into account the permissible voltage variations of lithium-ion battery cells, does not exceed 76% and will gradually increase when these voltages are equalized. An active balancer that uses inductive cells to transfer charges has the best performance for balancing charges between the cells of a battery. Its efficiency is less dependent on the uneven distribution of charges in the battery cells and can reach 95% or higher during operation, which, taking into account the accepted permissible voltage spread between these cells, saves up to 26% of electrical energy, which is especially important for energy conservation when using high-capacity batteries.

Key words: battery, cell, active balancer, charge equalization, reactive cells, energy efficiency, efficiency.

Электротехника, 2025, №7, стр. 62-69

Технологии двунаправленной беспроводной передачи энергии: состояние и перспективы

ЕРЕЩЕНКО Н.Д., ВНУКОВ С.А., ЩУРОВ Н.И., КРАВЧЕНКО Д.П., АБРАМОВ Е.Ю.

С расширением области применения технологии беспроводной передачи энергии возникла острая необходимость в технологии двунаправленной беспроводной передачи энергии для реализации энергетического взаимодействия между беспроводными зарядными устройствами. В статье анализируется состояние развития системы двунаправленной емкостной передачи энергии и связанные с этим ключевые проблемы, кратко описывается основной принцип работы системы двунаправленной беспроводной передачи энергии, обсуждаются основные достижения в плане типичных топологий двунаправленного преобразования, резонансных сетей, стратегий

управления мощностью и сценариев применения системы двунаправленной беспроводной передачи энергии.

Ключевые слова: двунаправленная беспроводная передача энергии, двунаправленная емкостная передача энергии, топология преобразования, поток энергии.

With the expansion of the field of application of wireless energy transmission technology, there is an urgent need for bidirectional wireless energy transmission technology to realize energy interaction between wireless chargers. The article analyzes the state of development of a bidirectional capacitive power transmission system and related key issues, briefly describes the basic principle of operation of a bidirectional wireless power transmission system, discusses the main achievements in terms of typical bidirectional conversion topologies, resonant networks, power management strategies and application scenarios for a bidirectional wireless power transmission system.

Key words: bidirectional wireless power transmission, bidirectional capacitive power transmission, conversion topology, energy flow.

Электротехника, 2025, №7, стр. 70-75

Метод быстрой оценки ёмкости аккумулятора электромобиля с помощью измерения импеданса

БОРЗЕНКОВ А.Н., ВНУКОВ С.А., МАЛОЗЁМОВ Б.В., ХАЛИКОВ И.Х., ЩУРОВ Н.И.

Точная оценка уровня заряда аккумуляторной батареи (State-of-charge, SOC) позволяет оценить её текущее состояние. Результатом управления состоянием аккумулятора является оптимизация его работы и продление срока службы, на который влияет количество циклов заряда/разряда. В статье приводится описание комплексного подхода измерения импеданса с помощью кулоновского метода. Методология измерения импеданса предназначена для оценки SOC аккумуляторов, применяемых в электромобилях, в условиях эксплуатации. Для подтверждения эффективности использования кулоновского метода с помощью программно-аппаратного комплекса проведены измерения импеданса для двух типов аккумуляторов – литий-ионных и свинцово-кислотных.

Ключевые слова: электромобиль, состояние заряда аккумулятора, кулоновский метод,

литий-ионный аккумулятор, свинцово-кислотный аккумулятор, литий-полимерный аккумулятор, никель-металлогидридный аккумулятор.

An accurate assessment of the battery charge level (State-of-charge, SOC) allows you to assess its current state. The result of battery health management is to optimize its operation and extend its service life, which is affected by the number of charge/discharge cycles. The article describes a comprehensive approach to measuring impedance using the Coulomb method. The impedance measurement methodology is designed to evaluate SOC batteries used in electric vehicles under operating conditions. To confirm the effectiveness of using the Coulomb method, impedance measurements for two types of batteries, lithium-ion and lead-acid, were performed using a hardware and software package.

Key words: electric vehicle, battery state of charge, Coulomb method, lithium-ion battery, lead-acid battery, lithium polymer battery, nickel metal hydride battery.

Электротехника, 2025, №7, стр. 76-81

Электрoзарядная станция электромобилей по стандарту CHAdeMO с накопителем энергии

АНДРИЯШИН С.Н., СИНГИЗИН И.И., БОРЗЕНКОВ А.Н., КРАВЧЕНКО Д.П.,
ЕРЕЩЕНКО Н.Д.

Предложен способ снижения местного воздействия электрoзарядных станций (ЭЗС) на сеть путем интеграции в состав ЭЗС аккумуляторной батареи в качестве буферного накопителя для снижения пиков потребления электрoэнергии. Разработан прототип ЭЗС с накопителем энергии типа LiFePo₄ построенный по топологии с общей шиной постоянного тока. Система управления ЭЗС стандарта CHAdeMO построена на контроллере в связке с микрокомпьютером, для которого разработано программное обеспечение верхнего уровня. Станция успешно протестирована на специализированном эмуляторе электромобиля, а также на электромобилях Nissan Leaf.

Ключевые слова: электрoзарядная станция, стандарт CHAdeMO, литий-ионная аккумуляторная батарея, накопитель энергии LiFePo₄, преобразователи постоянного тока, шина постоянного тока, контроллер зарядной станции.

A method is proposed to reduce the local impact of electric charging stations (EPPS) on the network by integrating a battery into the EMF as a buffer storage device to reduce peaks in electricity consumption. A prototype of an EHS with a LiFePO₄ type energy storage device has been developed, built according to a topology with a common DC bus. The ECS control system of the CHAdeMO standard is built on a controller in conjunction with a microcomputer, for which top-level software has been developed. The station has been successfully tested on a specialized electric vehicle emulator, as well as on Nissan Leaf electric vehicles.

Key words: electric charging station, CHAdeMO standard, lithium-ion rechargeable battery, LiFePO₄ energy storage, DC converters, DC bus, charging station controller.

Электротехника, 2025, №7, стр. 82-87

Влияние частоты питающего напряжения на эффективность работы озонатора МАКСУДОВ Д.В.

Рассмотрено влияние частоты питающего напряжения на производительность озонатора. Разработан итерационный процесс для моделирования движения ионов в разрядном промежутке озонатора и определения оптимальной частоты, которой соответствует максимальная производительность. Исследована зависимость оптимальной частоты от температуры, давления, состава газовой смеси, проходящей через озонатор, приложенного напряжения.

Ключевые слова: озонатор, барьерный разряд, синтез озона, частота питающего напряжения, итерационный процесс.

The influence of the frequency of the supply voltage on the performance of the ozonator is considered. An iterative process has been developed to simulate the movement of ions in the discharge gap of the ozonator and determine the optimal frequency, which corresponds to maximum performance. The dependence of the optimal frequency on temperature, pressure, composition of the gas mixture passing through the ozonator, and applied voltage is investigated.

Key words: ozonator, barrier discharge, ozone synthesis, supply voltage frequency, iterative process.

Электротехника, 2025, №7, стр. 88-89

Старейшему электротехническому журналу «Электричество» – 145 лет

БУТЫРИН П.А.

Электротехника, 2025, №7, стр. 90-91

Авторы номера