

Содержание

Электротехника, 2026, №6, стр. 2-8

Диагностика состояния аккумуляторной батареи электромобиля на основе анализа кривой Найквиста и импедансной спектроскопии

БОРЗЕНКОВ А.Н., ВНУКОВ С.А., МАЛОЗЁМОВ Б.В., ХАЛИКОВ И.Х., ЩУРОВ Н.И., АБРАМОВ Е.Ю., ЕРЕЩЕНКО Н.Д., КРАВЧЕНКО Д.П.

Рассмотрена быстрая методика определения технического состояния аккумуляторных батарей на основе электрохимической импедансной спектроскопии (EIS) и анализа кривой Найквиста. В отличие от традиционных кулоновских методов, требующих полного цикла заряда и разряда, предложенный подход позволяет оперативно оценивать состояние заряда (SOC), состояние здоровья (SOH), функциональное состояние (SOF) и внутренние деградиационные процессы без вывода батареи из эксплуатации на длительное время. Метод основан на подаче малосигнального гармонического воздействия в широком диапазоне частот и последующем построении комплексной частотной характеристики импеданса. Показано, что параметры кривой Найквиста – активная составляющая сопротивления, радиус и форма полукруга, а также низкочастотная диффузионная область – коррелируют с электрохимическими и диффузионными процессами в аккумуляторе и изменяются по мере старения. Предложен алгоритм интерпретации спектров для диагностики деградации и сравнительного анализа аккумуляторов различных типов. Обоснована возможность существенного сокращения времени диагностики и энергозатрат при сохранении высокой информативности измерений. Показано, что использование метода EIS в составе систем мониторинга аккумуляторных батарей транспортных и стационарных электротехнических комплексов позволяет повысить точность оценки их ресурса и надёжности.

Ключевые слова: электротехнические комплексы, аккумуляторные батареи, импедансная спектроскопия, кривая Найквиста, некулоновские методы, диагностика состояния, внутренняя деградация.

A rapid technique for determining the technical condition of batteries based on electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and Nyquist curve analysis is considered. Unlike traditional Coulomb methods that require a full charge and discharge cycle, the proposed approach makes it possible to quickly assess the state of charge (SOC), state of health (SOH), functional state (SOF) and internal degradation processes without decommissioning the battery for a long time. The method is based on the application of low-signal harmonic effects in a wide frequency range and the subsequent construction of a complex frequency response of the impedance. It is shown that the parameters of the Nyquist curve – the active component of the resistance, the radius and shape of the semicircle, as well as the low-frequency diffusion region - correlate with electrochemical and diffusion processes in the battery and change with aging. An algorithm for interpreting spectra for the diagnosis of degradation and comparative analysis of batteries of various types is proposed. The possibility of a significant reduction in diagnostic time and energy consumption while maintaining high information content of measurements is substantiated. It is shown that the use of the EIS method as part of battery monitoring systems for transport and stationary electrical complexes makes it possible to increase the accuracy of estimating their life and reliability.

Key words: electrical engineering complexes, rechargeable batteries, impedance spectroscopy, Nyquist curve, non-Coulomb methods, condition diagnostics, internal degradation.

Электротехника, 2026, №6, стр. 9-17

Имитационная модель силовой схемы карьерного экскаватора для анализа режимов работы диодных модулей выпрямителя

АБРАМОВ Е.Ю., ВНУКОВ С.А., МАЛОЗЁМОВ Б.В., МЯТЕЖ С.В., ЩУРОВ Н.И.,
АНДРИЯШИН С.Н., СИНГИЗИН И.И., ЛАТЫШЕВ Р.Н.

Представлена разработка и верификация имитационной модели силовой схемы карьерного экскаватора с вентильно-индукторным электроприводом. Модель предназначена для анализа электрических режимов входного выпрямителя и связанных с ними тепловых нагрузок диодных модулей МДх-1000-28-D. По данным инструментального обследования объекта в среде MATLAB Simulink построена модель, включающая подсистемы силового трансформатора, выпрямителя, звена постоянного тока, рекуператора, инверторов, эквивалентной нагрузки и тепловой

модели диодного модуля. Выполнена верификация электрической части модели по осциллограммам напряжений и токов, зарегистрированным на реальном объекте. Показано, что модель позволяет определять токовые и тепловые режимы диодных модулей, в том числе оценивать мгновенные значения температуры кристалла и поверхности охладителя при эксплуатационных и возмущённых режимах.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, выпрямитель, инвертор, электропривод, диодный модуль, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, имитационное моделирование, MATLAB Simulink.

The development and verification of a simulation model of the power circuit of a mining excavator with a valve-inductor electric drive is presented. The model is designed to analyze the electrical modes of the input rectifier and the associated thermal loads of diode modules MDx-1000-28- D. Based on the data of the instrumental examination of the facility in the MATLAB Simulink environment, a model was built that includes subsystems of a power transformer, a rectifier, a direct current link, a heat exchanger, inverters, an equivalent load, and a thermal model of a diode module. Verification of the electrical part of the model was performed using voltage and current waveforms recorded on a real object. It is shown that the model makes it possible to determine the current and thermal modes of diode modules, including estimating the instantaneous temperature values of the crystal and the cooler surface under operational and perturbed conditions.

Key words: mining excavator, rectifier, inverter, electric drive, diode module, electromagnetic compatibility, power quality, simulation, MATLAB Simulink.

Электротехника, 2026, №6, стр. 18-24

**Анализ и моделирование механизмов старения литий-ионных батарей,
используемых в электротранспорте**

ЩУРОВ Н.И., ШАБАЛИН Р.В., ШТАНГ А.А., КРАВЧЕНКО Д.П., АБРАМОВ Е.Ю.,
СИНГИЗИН И.И., МАЛОЗЁМОВ Б.В., БОРЗЕНКОВ А.Н.

Представлены результаты исследования процессов деградации тяговых аккумуляторов. Исследованы основные механизмы и причины, влияющие на уменьшение эффективной емкости литий-ионных аккумуляторов. На основе имитационной модели электромобиля исследован процесс деградации аккумулятора и определены

оптимальные режимы его эксплуатации. Выявлено, что амплитуда тока тяги значительно влияет на степень ухудшения состояния аккумуляторной батареи. Установлено, что ключевым фактором, влияющим на скорость деградации зарядной емкости батарей, является интенсивность потребления тока. Для снижения эффектов высоких разрядных токов предложено использование батарей нового поколения с повышенными характеристиками мощности и увеличенным числом возможных циклов заряд/разряд. В среде MATLAB Simulink разработана модель электромобиля «Москвич-3», отнесенного к третьему классу по мощностной классификации, оснащенная как стандартным, так и гибридным аккумулятором на 25 кВт·ч.

Ключевые слова: электротранспорт, литий-ионные батареи, механизмы старения батареи, моделирование.

The results of a study of the degradation processes of traction batteries are presented. The main mechanisms and causes influencing the decrease in the effective capacity of lithium-ion batteries are investigated. Based on the simulation model of an electric vehicle, the process of battery degradation is investigated and optimal operating modes are determined. It is revealed that the amplitude of the thrust current significantly affects the degree of deterioration of the battery. It has been established that the intensity of current consumption is a key factor influencing the rate of degradation of battery charging capacity. To reduce the effects of high discharge currents, it is proposed to use a new generation of batteries with increased power characteristics and an increased number of possible charge/discharge cycles. The MATLAB Simulink environment has developed a model of the Moskvich-3 electric car, classified in the third class according to the power classification, equipped with both a standard and a 25 kWh hybrid battery.

Key words: electric transport, lithium-ion batteries, battery aging mechanisms, modeling.

Электротехника, 2026, №6, стр. 25-32

Аналитическая модель ячеек аккумуляторной батареи в режиме заряда и разряда
МЕНЬЩИКОВ А.В., МЯТЕЖ С.В., ЩУРОВ Н.И., БОРЗЕНКОВ А.Н., ЛАТЫШЕВ Р.Н.,
ХАЛИКОВ И.Х., ШТАНГ А.А., ЕРЕЩЕНКО Н.Д.

Рассмотрен способ построения простой аналитической модели, в которой наглядно отражается влияние входных параметров на напряжение ячеек аккумуляторной батареи в режиме заряда/разряда. Модель представляет собой алгебраическое выражение без

нелинейных коэффициентов и дифференциальных компонент, единое для всех режимов и не зависящее от второстепенных характеристик. Это позволяет рассматривать модель как самостоятельный и простой инструмент для решения различных оптимизационных задач, а также строить на её основе компактные имитационные модели, структура которых для всех режимов остается простой и неизменной. Преимущество этих моделей в существенной степени проявляется при решении практических задач, в которых необходим анализ одновременного взаимодействия большого количества ячеек в составе современных энергоёмких аккумуляторных батарей, где быстрота получения ответа и экономия вычислительных ресурсов оказываются решающими факторами.

Ключевые слова: аккумулятор, ячейка, модель, параметры, эмпирические выражения, ёмкость, вычислительный ресурс.

A method for constructing a simple analytical model is considered, which clearly reflects the influence of input parameters on the voltage of battery cells in charge/discharge mode. The model is an algebraic expression without nonlinear coefficients and differential components, uniform for all modes and independent of secondary characteristics. This allows us to consider the model as an independent and simple tool for solving various optimization problems, as well as to build compact simulation models based on it, the structure of which remains simple and unchanged for all modes. The advantage of these models is significantly manifested in solving practical problems in which it is necessary to analyze the simultaneous interaction of a large number of cells in modern energy-intensive batteries, where the speed of response and saving computing resources are crucial factors.

Key words: battery, cell, model, parameters, empirical expressions, capacity, computational resource.

Электротехника, 2026, №6, стр. 33-36

Оптимальные соотношения размеров электромагнита с поперечным в области энергопреобразования магнитным потоком

НЕЙМАН В.Ю.

Представлен метод выбора оптимальных соотношений геометрических размеров силового электромагнита с поперечным магнитным потоком, соответствующих

минимальному весу. За критерий оптимальности принят показатель удельной работоспособности – отношение предельной механической работы электромагнита к общей массе его активного объема. Основные результаты получены с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля. На основании выполненного анализа даны рекомендации по использованию оптимальных соотношений размеров в задачах проектирования.

Ключевые слова: силовой электромагнит, поперечный магнитный поток, оптимальные соотношения размеров, механическая работа, весовые показатели, численное моделирование.

A method is presented for selecting optimal ratios of the geometric dimensions of a power electromagnet with a transverse magnetic flux corresponding to the minimum weight. The criterion of optimality is the indicator of specific working capacity – the ratio of the maximum mechanical work of an electromagnet to the total mass of its active volume. The main results were obtained using finite element modeling of the magnetic field. Based on the performed analysis, recommendations are given on the use of optimal size ratios in design tasks.

Key words: power electromagnet, transverse magnetic flux, optimal size ratios, mechanical operation, weight indicators, numerical modeling.

Электротехника, 2026, №6, стр. 37-41

Имитационная модель линейного дискретного электропривода для систем позиционирования

НЕЙМАН Л.А., НЕЙМАН В.Ю.

Предложена имитационная динамическая модель линейного дискретного электропривода. Рассмотрены структура и элементный состав электропривода, в качестве исполнительного устройства которого применяется шестифазный электромагнитный привод, выполненный в виде отдельных механически связанных модулей. Основываясь на идентичности фаз электропривода, рассмотрен общий принцип формирования его математической модели в виде системы дифференциальных уравнений электрического и механического равновесия электромеханической системы, дополненной двухмерными массивами значений потокосцепления и электромагнитного усилия и предложен вариант их реализации в

среде MATLAB Simulink. В модели учтены взаимное влияние электромагнитных и механических процессов, магнитные свойства стали, потоки рассеяния и потери энергии в электрической и механической системах. Рассмотрен пример использования имитационной модели для расчета динамических характеристик.

Ключевые слова: линейный дискретный электропривод, электромагнитный привод, имитационная модель, математическая модель, динамические характеристики.

A simulation dynamic model of linear discrete electric power is proposed. The structure and elemental composition of an electric drive are considered, as an executive device of which a six-phase electromagnetic drive is used, made in the form of separate mechanically connected modules. Based on the identity of the phases of an electric drive, the general principle of forming its mathematical model in the form of a system of differential equations of electrical and mechanical equilibrium of an electromechanical system is considered, supplemented by two-dimensional arrays of values of flow coupling and electromagnetic force, and a variant of their implementation in the MATLAB Simulink environment is proposed. The model takes into account the mutual influence of electromagnetic and mechanical processes, the magnetic properties of steel, scattering fluxes and energy losses in electrical and mechanical systems. An example of using a simulation model to calculate dynamic characteristics is considered.

Key words: linear discrete electric drive, electromagnetic drive, simulation model, mathematical model, dynamic characteristics.

Электротехника, 2026, №6, стр. 42-47

Приближенный расчет электромагнитного поля явнополюсной электрической машины с нелинейными магнитными свойствами ротора

БЛАНК А.В.

Слоистые модели, известные в теоретических исследованиях электрических машин, послужили основой для создания каскадных схем замещения, весьма удобных для практических расчетов. Каскадная схема замещения сочетает в себе достоинства слоистой модели с простотой расчета электромагнитного поля в активном объеме электрической машины, так как по существу представляет собой активно-индуктивную электрическую цепь, которую можно рассчитывать любым методом, известным в теории электрических цепей. Важно и то, что каскадные схемы замещения

электрических машин создаются на основе фундаментальных законов электромагнетизма и теории электрических цепей. В статье на основе приближенных решений дифференциальных уравнений в частных производных предложены каскадные схемы замещения явнополюсных машин, в частности, нелинейная схема замещения явнополюсной синхронной электрической машины. В силу специфики каскадных схем замещения явнополюсных машин нелинейная схема замещения позволяет выполнить лишь приближенный расчет магнитного поля машины (при введении допущения о постоянстве магнитной проницаемости при изменении положения рабочей точки на кривой намагничивания). Ошибка при приближенном расчете будет определяться свойствами кривой намагничивания и особенностями режимов работы машины.

Ключевые слова: электрические машины, явнополюсные машины, синхронные электрические машины, теория электромагнитного поля, теория электрических цепей, каскадные схемы замещения.

Layered models, known in theoretical studies of electrical machines, served as the basis for the creation of cascade substitution schemes, which are very convenient for practical calculations. The cascade substitution scheme combines the advantages of a layered model with the simplicity of calculating the electromagnetic field in the active volume of an electric machine, since it is essentially an active-inductive electrical circuit that can be calculated using any method known in the theory of electrical circuits. It is also important that cascade replacement circuits for electric machines are created based on the fundamental laws of electromagnetism and the theory of electrical circuits. Based on approximate solutions of partial differential equations, cascade substitution schemes for single-pole machines are proposed in the article, in particular, a nonlinear substitution scheme for a single-pole synchronous electric machine. Due to the specifics of cascade substitution schemes for single-pole machines, the nonlinear substitution scheme allows only an approximate calculation of the magnetic field of the machine (with the assumption of constant magnetic permeability when changing the position of the working point on the magnetization curve). The error in the approximate calculation will be determined by the properties of the magnetization curve and the peculiarities of the operating modes of the machine.

Key words: electric machines, single-pole machines, synchronous electric machines, theory of electromagnetic field, theory of electric circuits, cascade substitution schemes.

**Формирование оперативного сценария управления электрическим режимом
дуговой сталеплавильной печи**

ГОРЕВА Л.П., БИКЕЕВ Р.А., АНЬШАКОВ А.С.

Рассмотрена методика формирования оперативных точек управления для регулирования электрического режима дуговой сталеплавильной печи (ДСП) при реализации определенной стратегии экономической оптимизации, например, минимума расхода электроэнергии или максимума производительности печи. Задача решается на основе анализа электрических и рабочих характеристик ДСП на каждой ступени напряжения печного трансформатора; при этом необходимо учитывать электрические параметры электропечного контура и параметры источника питания. Методика продемонстрирована на примере отечественной сверхвысокомощной ДСП емкостью 100 тонн, реализующем стратегию максимума производительности печи и наглядно показывающем возможности и ограничения, возникающие на практике.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрический режим, оперативный сценарий управления, экономическая оптимизация.

The method of forming operational control points for regulating the electrical regime of an arc steelmaking furnace (ASF) is considered when implementing a certain strategy of economic optimization, for example, a minimum of electricity consumption or maximum furnace productivity. The problem is solved based on the analysis of the electrical and operating characteristics of the ASF at each voltage stage of the furnace transformer; at the same time, it is necessary to take into account the electrical parameters of the furnace circuit and the parameters of the power source. The technique is demonstrated using the example of a domestic ultra-high-power ASF with a capacity of 100 tons, which implements a strategy for maximizing furnace productivity and clearly shows the possibilities and limitations that arise in practice.

Key words: arc steelmaking furnace, electric mode, operational control scenario, economic optimization.

Имитационная модель динамики системы «Продуктивный пласт – электроцентробежный насос – насосно-компрессорные трубы – устье скважины»
БАШАРОВ Р.Р., ДОМАХИН Е.А., ПОПОВ Н.С.

Рассмотрена имитационная модель для исследования динамики системы «Продуктивный пласт – электроцентробежный насос – насосно-компрессорные трубы – устье скважины» в переходных режимах при частотном регулировании. Модель предназначена для анализа нестационарных процессов, возникающих при изменении частоты вращения погружного электродвигателя насосной установки. В состав модели включены три взаимосвязанных подсистемы: гидродинамика пласта, динамическое подобие электроцентробежного насоса и динамика потока в насосно-компрессорных трубах. Исследовано влияние времени разгона насосной установки на динамические параметры системы. Установлено, что при малых временах разгона система носит слабодемпфированный характер, сопровождающийся значительными колебаниями. Увеличение времени разгона приводит к снижению амплитуды колебаний и более плавному выходу системы в установившийся режим.

Ключевые слова: нефтедобыча, установка электроцентробежных насосов, имитационная модель, частотное регулирование, динамика системы, переходные процессы.

A simulation model for studying the dynamics of the system «Productive reservoir – electric centrifugal pump – tubing – wellhead» in transient modes with frequency control is considered. The model is designed to analyze non-stationary processes that occur when the rotational speed of a submersible electric motor of a pumping unit changes. The model includes three interrelated subsystems: reservoir hydrodynamics, dynamic similarity of an electric centrifugal pump, and flow dynamics in tubing. The influence of the acceleration time of the pumping unit on the dynamic parameters of the system is investigated. It is established that at low acceleration times, the system has a weakly damped character, accompanied by significant fluctuations. An increase in acceleration time leads to a decrease in the amplitude of vibrations and a smoother system output to steady state.

Key words: oil production, installation of electric centrifugal pumps, simulation model, frequency control, system dynamics, transients.

Численное моделирование асинхронного электродвигателя с частотно-регулируемым приводом при его промышленном применении для производства лекарственных препаратов

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

Получены характеристики асинхронного электродвигателя с частотно-регулируемым приводом в условиях его эксплуатации при производстве лекарственных препаратов, выявлены особенности этих характеристик при пуске с различными, в том числе изменяющимися во времени нагрузками, а также при различной продолжительности разгона до номинальной частоты. Моделированием электромагнитного поля методом конечных элементов определены токи в обмотке статора и короткозамкнутой обмотке ротора, определена электромагнитная сила и характеристики вращения ротора с автоматической перестройкой конечно-элементной сетки. Представлены результаты вычислительных и натурных экспериментов в установившемся режиме и режиме пуска с изменяющейся во времени нагрузкой. Получены рабочие характеристики асинхронного двигателя для различных нагрузок и длительностей разгона.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, режим разгона, электромагнитное поле, конечно-элементное моделирование.

The characteristics of an asynchronous electric motor with a frequency-controlled drive in the conditions of its industrial operation in the manufacture of medicines are obtained, the features of these characteristics are revealed when starting with various loads, including time-varying loads, as well as with different acceleration times to the nominal frequency. By modeling the electromagnetic field using the finite element method, the currents in the stator winding and the short-circuited rotor winding were determined, the electromagnetic force and the characteristics of rotation of the rotor with automatic restructuring of the finite element grid were determined. The results of comparing computational and field experiments in steady-state and start-up mode with a time-varying load are presented. The operating characteristics of an asynchronous electric motor for various acceleration durations and loads are obtained.

Key words: asynchronous motor, acceleration mode, electromagnetic field, finite element modeling.

Электротехника, 2026, №6, стр. 67-71

Магнитное поле в зазоре беспазового двухроторного дискового электродвигателя
МАЛОМОШНОВ Н.К., ПРИСТУП А.Г., ЖИЛИН О.А.

Рассмотрено магнитное поле в воздушном зазоре беспазового двухроторного дискового электродвигателя с постоянными магнитами. Построена аналитическая модель в цилиндрических координатах при аксиальной намагниченности и синусоидальном распределении по азимутальному углу. На основе уравнения Лапласа и граничных условий получены выражения для потенциала, напряжённости и индукции в зазоре, а также для средней по толщине зазора рабочей гармоники. Введены безразмерные параметры, связывающие зазор и толщину магнита с локальным полюсным шагом, и показано их влияние на уровень поля. Отмечена радиальная неоднородность рабочей гармоники, важная для проектирования дисковых машин и проверки численных моделей.

Ключевые слова: двухроторная беспазовая аксиальная машина, постоянные магниты, аналитическая модель, безразмерные параметры.

The magnetic field in the air gap of a phase-free two-rotor disc electric motor with permanent magnets is considered. An analytical model is constructed in cylindrical coordinates with axial magnetization and sinusoidal azimuthal angle distribution. Expressions for potential, tension, and induction in the gap, as well as for the average gap thickness of the working harmonic, are obtained based on the Laplace equation and boundary conditions.

Dimensionless parameters are introduced that relate the gap and thickness of the magnet to the local pole pitch, and their effect on the field level is shown. The radial inhomogeneity of the working harmonic is noted, which is important for the design of disk machines and the verification of numerical models.

Key words: two-rotor phase-free axial machine, permanent magnets, analytical model, dimensionless parameters.

Синтез бездатчиковой системы управления погружным синхронным электроприводом плунжерного насоса с учётом протяжённой питающей цепи
АНИБРОЕВ В.И., КОТИН Д.А., ПОПОВ Н.С., ДОМАХИН Е.А.

Рассмотрен синтез бездатчиковой системы векторного управления погружным синхронным двигателем с постоянными магнитами в составе электропривода плунжерного насоса малodeбитной скважины. Особенностью объекта является протяжённая питающая цепь – трансформатор и кабельная линия длиной 2000 м – с суммарным сопротивлением, превышающим сопротивление статора в 5–6 раз. Показано, что пренебрежение параметрами цепи в ЭДС-наблюдателе приводит к потере устойчивости системы. Аналитически получено ограничение пропорционального коэффициента регулятора тока, вытекающее из условия запаса по усилению на резонансной частоте приведённой цепи при коэффициенте демпфирования $\zeta \approx 0,052$. Для оценки угла и скорости ротора применён ЭДС-наблюдатель с алгоритмом фазовой автоподстройки частоты двойного угла, инвариантный к знаку скорости в реверсивном режиме насоса. По результатам имитационного моделирования в среде SimInTech подтверждена точность оценки угла $\pm 0,005$ рад, устойчивая работа при реверсе и верифицировано аналитическое условие устойчивости.

Ключевые слова: погружной электропривод, плунжерный насос, синхронный двигатель с постоянными магнитами, бездатчиковое управление, ЭДС-наблюдатель, фазовая автоподстройка частоты двойного угла, метод желаемых полюсов.

The synthesis of a sensor-free vector control system for a submersible synchronous motor with permanent magnets as part of an electric drive of a plunger pump in a low-flow well is considered. A special feature of the facility is an extended supply circuit – a transformer and a cable line 2000 m long – with a total resistance exceeding the resistance of the stator by 5-6 times. It is shown that neglecting the circuit parameters in the EMF-observer leads to a loss of stability of the system. A limitation of the proportional coefficient of the current regulator has been analytically obtained, resulting from the gain reserve condition at the resonant frequency of the reduced circuit with a damping coefficient of $\zeta \approx 0,052$. To estimate the angle and speed of the rotor, an EMF-observer with a double-angle phase auto-tuning algorithm, invariant to the speed sign in the reverse pump mode, has been applied. Based on the results of simulation

modeling in the SimInTech environment, the accuracy of the angle estimate $\pm 0,005$ rad, stable reverse operation, and the analytical stability condition were verified.

Key words: submersible electric drive, plunger pump, permanent magnet synchronous motor, sensorless control, EMF-observer, phase auto-tuning of the double angle frequency, desired pole method.

Электротехника, 2026, №6, стр. 79-84

Синтез энергосберегающих законов управления электропечами сопротивления **МОЗЖЕЧКОВ В.А., ЛОВЧАКОВ В.И.**

Показано, что расчет программы управления электрическими печами сопротивления, оптимальной по критерию затрат энергии, может быть выполнен посредством линейного программирования, а реализация полученной программы – методом управления с прогнозирующей моделью, позволяющим компенсировать погрешности программного управления в результате использования обратной связи.

Сформулирована математическая постановка задачи синтеза энергосберегающих законов управления электропечами сопротивления и предложен метод ее решения, обеспечивающий по сравнению с известными методами существенное сокращение затрат энергии при управлении печью, высокую точность регулирования температуры, а также возможность учета ограничений на значения регулируемой величины и управляющего воздействия. Рассмотрен пример реализации предлагаемого метода.

Ключевые слова: электрическая печь сопротивления, энергосберегающие законы управления, управление с прогнозирующей моделью, оптимизация.

It is shown that the calculation of the control program for electric resistance furnaces, optimal according to the criterion of energy consumption, can be performed by linear programming, and the implementation of the resulting program by a control method with a predictive model that allows compensating for errors in program control as a result of feedback. A mathematical formulation of the problem of synthesizing energy-saving laws for controlling electric resistance furnaces is formulated and a method for solving it is proposed, which provides, in comparison with known methods, a significant reduction in energy consumption during furnace control, high accuracy of temperature control, as well as the possibility of taking into account restrictions on the values of the controlled value and control action. An

example of the implementation of the proposed method is considered.

Key words: electric resistance furnace, energy-saving control laws, control with predictive model, optimization.

Электротехника, 2026, №6, стр. 85-91

Управление пуском электрических машин в карьерной мобильной микросети
МАЛАФЕЕВ С.И., МАЛАФЕЕВА А.А., СЕРЕБРЕННИКОВ Н.А., ЧИСТЯКОВ В.С.

Рассмотрены особенности энергетических процессов в мобильной карьерной микросети с дизель-генераторной энергетической установкой при включении асинхронных двигателей соизмеримой с источником энергии мощности. Выполнено исследование частотного пуска асинхронного двигателя при регулировании частоты вращения дизельного двигателя. Выведены уравнения для пускового момента асинхронного двигателя при подключении к источнику соизмеримой мощности с регулируемой частотой. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований процессов в мобильной микросети.

Ключевые слова: горные предприятия, микросеть, дизель-генераторная энергетическая установка, синхронный генератор, асинхронный двигатель, управление, моделирование.

The features of energy processes in a mobile mining microgrid with a diesel generator set are reviewed when asynchronous motors of comparable power to an energy source are turned on. A study of frequency start of an asynchronous motor when controlling the rotation speed of a diesel engine has been performed. Equations are derived for the starting torque of an asynchronous motor when connected to a source of commensurate power with an adjustable frequency. The results of modeling and experimental studies of processes in a mobile microgrid are presented.

Key words: mining enterprises, microgrid, diesel generator set, synchronous generator, asynchronous motor, control, modeling. start-up of electric machines in a mobile mining microgrid.

Электротехника, 2026, №6, стр. 92-94

Авторы номера