

Исследование процессов зажигания, горения и обрыва дуги в дуговой печи постоянного тока с импульсным транзисторным источником питания
РУБЦОВ В.П.

Выполнен анализ процессов, протекающих в транзисторном импульсном источнике питания постоянного тока, нагруженном на индуктивную нагрузку с дугой. Разработана имитационная модель в среде Simulink, которая адекватно отражает все процессы, протекающие в реальном источнике питания. Модель позволяет получить временные зависимости величин, характеризующих работу системы, причем в большем объеме по сравнению с зависимостями, измеренными непосредственно на физической модели. Особенностью разработанной модели является возможность наблюдения временных зависимостей на всех элементах электрической схемы. В частности, с помощью разработанной модели удалось получить осциллограммы ЭДС самоиндукции, возникающей на индуктивности короткой сети при обрыве дуги. Предложена система относительных величин, позволяющая получить обобщенные электрические характеристики регулируемого импульсного источника питания постоянного тока, нагруженного на индуктивную цепь с электрической дугой. Особенностью предложенной системы относительных величин является то, что время сохранено реальным. Это делает более наглядным сравнение временных характеристик различных источников питания.

Ключевые слова: транзисторный импульсный источник постоянного тока, имитационная модель дуговой печи постоянного тока, перенапряжения при обрыве дуги.

In the article the analysis of the processes occurring in the transistor by the pulse source, DC power supply, loaded by inbreeding load with arc. Developed a simulation model in the Simulink environment, which adequately reflects all the processes in a real power supply. The model allows us to obtain time dependences of the quantities characterizing the system, and to a greater extent in comparison with the dependences measured directly on the physical model. A feature of this model is the possibility of observing temporal dependencies on all elements of the electrical circuit. In particular, using the developed model was able to obtain the oscilloscope self-induced EMF arising in the inductor short network at breakage of the arc. The proposed system of relative values that allow to obtain the generalized electrical characteristics of the adjustable switching power supply DC, which is loaded on an inductive circuit with an electric arc. Feature of the proposed system relative to those values is that the time saved is real. This makes for a more visual comparison of temporal characteristics of different sources of supply.

Key words: transistor switching DC power supply, the simulation model of the DC arc furnace, overvoltages at breakage of the arc.

Электротехника, 2019, №4, стр.7-12

Новая серия асинхронных частотно-регулируемых двигателей для карьерных экскаваторов

МАЛАФЕЕВ С.И., ЗАХАРОВ А.В., САФРОНЕНКОВ Ю.А.

Приведены результаты разработки и освоения производства новой серии низковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором для карьерных экскаваторов. Проведен анализ условий эксплуатации электродвигателей в приводах карьерных экскаваторов и других машин горной техники, рассмотрены основные технические характеристики традиционных для данного применения двигателей постоянного тока. Сформулированы основные требования, предъявляемые к электроприводу и электрическим машинам переменного тока для горной техники. Сформирован состав серии частотно-регулируемых низковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором для линейки экскаваторов нового поколения. При разработке серии проведена минимизация количества ее типоразмеров. Представлена концепция проектирования. Приведены энергетические характеристики разработанных машин, показаны типичные зависимости основных энергетических и электромеханических характеристик от частоты вращения в диапазоне ее регулирования. Приведены основные результаты лабораторных и полевых испытаний электроприводов переменного тока на основе разработанных электродвигателей. Показано применение электрических машин в мехатронных системах карьерных экскаваторов.

Ключевые слова: горная техника, экскаваторный электропривод, асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, частотно-регулируемый электропривод.

The results of research, development and serial production launch of a new series of low-voltage induction motors with a squirrel-cage rotor for mining excavators are presented. The analysis of the operating conditions of electric motors in the drives of mining excavators and mining equipment is carried out, the main technical characteristics of the DC motors, which are traditional for this application, are considered. On the basis of the performed analysis, the main requirements for the electric drive and AC electric machines necessary for mining equipment are

formulated. The assortment of a series of frequency-controlled low-voltage induction motors with a squirrel-cage rotor for a line of excavators of a new generation is composed. When developing the assortment of the series, the number of its sizes has been minimized. The concept of design is presented. The energy characteristics of the developed motors, typical dependences of the energy and electromechanical characteristics on the rotor speed in the range of its control are shown. The main results of laboratory and field tests of AC electric drives based on the developed electric motors are presented. The use of electric machines in mechatronic systems of the mining excavators is shown.

Key words: mining equipment, electric drive for excavator, induction motor with squirrel-cage rotor, adjustable-frequency drive.

Электротехника, 2019, №4, стр.13-19

Векторное управление электроприводом переменного тока с многоуровневым преобразователем частоты на базе H-мостов

НОС О.В., ВОЛКОВ В.Ю., ВДОВИН В.В., КЛАН В.А., НОС Н.И.

Применение многоуровневых топологий автономного инвертора в составе асинхронных или синхронных электроприводов позволяет добиться их функционирования в некоторых аварийных ситуациях, связанных, например, с выходом из строя какого-либо элемента в силовой цепи или непродолжительным сбоем в работе распределительной линии централизованной системы электроснабжения. В последнем случае за счет перевода контура скорости в режим регулирования напряжений емкостных фильтров удается в течение короткого промежутка времени поддерживать на заданном уровне магнитное состояние и механические координаты электрической машины без непосредственного отключения преобразовательного устройства по соответствующему сигналу с узла защиты. В статье приведены расчетные соотношения для синтеза специальных алгоритмов векторного управления исполнительным двигателем переменного тока при отсутствии внешнего питания, основанные на заданном распределении корней характеристического полинома на комплексной плоскости, а также приведении логарифмической амплитудно-фазовой частотной характеристики контура в разомкнутом состоянии к нормированному виду. В рамках этих соотношений осуществляется рекуперация электрической энергии в автономный инвертор с каскадным включением H-мостов с целью стабилизации напряжения конденсаторной батареи в каждом из силовых модулей, благодаря чему при восстановлении работоспособности трехфазной сети

происходит возврат к нормальному режиму работы электропривода без существенной потери качества процессов по частоте вращения ротора.

Ключевые слова: многоуровневый преобразователь, электропривод переменного тока, аварийный режим, управление напряжением силовой емкости.

In practical applications, the multilevel converter topologies for induction or synchronous AC drives application allow to operate under fault conditions in case, when the failure of any units in the power circuit or short-term blackouts in the distribution feeder of AC power supply. In the last event, by means of speed loop reconfiguration for control of the DC-link voltages, it is possible to maintain the flux and speed of the electrical machine close to the reference values during short time without emergency shutdown of power converter after fault incident. This paper is dedicated to design procedures of special vector AC motor control under fault conditions with emergency power cut off based either on desired root locus of characteristic polynomial on the complex plane or on tuning of open-loop asymptotic bode magnitude plot to the normalized form. In according of these techniques, the electric energy recuperation into the multilevel series-connected H-bridge inverter is accomplished for capacitor bank voltage control in the each power cells, whereby after three-phase grid recovery the AC drive returns to the normal operation without significantly degradation of the rotor speed performances.

Key words: multilevel converter, AC drive, operation under fault conditions, capacitor voltage balancing control.

Электротехника, 2019, №4, стр.19-24

Эффективные топологии беспазовой высокоскоростной электрической машины для аэрокосмической отрасли

ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ВАВИЛОВ В.Е., БЕКУЗИН В.И., АЙГУЗИНА В.В.

Изложены результаты исследований высокоскоростных беспазовых электрических машин различной топологии с магнитопроводом статора из аморфного железа, определена наиболее эффективная из них. Для оценки эффективности применения той или иной топологии были спроектированы и изготовлены четыре экспериментальных макета, проведены исследования потерь в магнитопроводах статоров. По результатам испытаний макетов разработано четыре компьютерные модели. Полученные данные могут быть использованы при проектировании высокоскоростных беспазовых электрических машин

мощностью 50–60 кВт с сосредоточенной обмоткой и частотой вращения 60000 об/мин.

Ключевые слова: высокоскоростные беспазовые электрические машины, аморфное железо, авиакосмическая отрасль.

This paper presents the research of slot less high-speed electrical machines with various topology with stator core made of amorphous alloy. The most efficient topology was selected. To assess the application effectiveness of each topology, four experimental models were designed. The stator core loss research was made. According to the test results, four computer models were developed. The obtained data can be used in the design slot less high-speed electrical machines 50–60 kW with concentrated windings and a 60000 rpm rotational speed.

Key words: high speed offered electrical machines, amorphous iron, aerospace industry.

Электротехника, 2019, №4, стр.24-32

Синтез и математическое моделирование электропривода подачи обрабатывающего центра с цифровой синергетической системой управления

РЕПИН А.А., СМИРНОВ А.Ю., СТРЕЛКОВ В.Ф.

На основе результатов сравнительного анализа выявлены основные достоинства и недостатки традиционных подходов к построению цифровых систем управления электроприводами подачи обрабатывающих центров и обоснована актуальность применения методов адаптивно-самоорганизующегося управления вместо классических принципов подчиненного регулирования координат. Представлены функциональная схема и математическая модель электропривода механизма подачи обрабатывающего центра с цифровой системой регулирования положения исполнительного органа, синтезированной при помощи метода аналитического конструирования агрегированных дискретных регуляторов, разработанного согласно синергетической теории управления. Показаны основные этапы методики синтеза дискретного векторного синергетического закона управления электроприводом подачи в полной нелинейной постановке с учётом упруго-вязких свойств механической части привода и изменяющейся во времени формы сигнала задания по положению. На основе анализа результатов вычислительных экспериментов сделаны выводы об эффективности синергетического подхода, как инструмента для разработки цифровых электроприводов станков с числовым программным управлением. Подтверждены незначительность влияния скачкообразных изменений параметров

нагрузки на валу на функционирование цифровой синергетической системы управления, аperiodический характер переходных процессов по положению, а также высокая точность отработки исполнительным органом механизма подачи технологических уставок в режиме слежения за задающим сигналом.

Ключевые слова: обрабатывающий центр, цифровая система управления, синергетический подход, метод аналитического конструирования агрегированных дискретных регуляторов.

Advantages and disadvantages of conventional approaches to the computer numerical control tools' feed drives design are revealed based on comparative analysis results as well as adaptive self-organizing methods application's actuality is well founded instead of classical cascade control methods application. The function circuit and the mathematical model of a computer numerical control tool feed drive mechanism with operating member's position digital control system, which was synthesized corresponds to the analytical design of aggregated digital regulators method of synergetic control theory, are designed. A discrete vector control law synthesis technique's basic stages are shown on complete nonlinear form for feed electric drive taking into consideration viscoelastic properties of the drive mechanical part as well as time-dependent position reference signal. Our decision on high efficiency of the synergetic approach's application for synthesis of the digital computer numerical control tools' drives control systems has been made based on the computational experiment results. Negligible dependence on the shaft's load intermittent variations for synergetic digital control system's functioning as well as aperiodic type of the position transients are confirmed. High precision of technological references' tracking is verified for feed drive's operating member.

Key words: machining center, digital control system, synergetic approach, analytical design of aggregated digital regulators' method.

Электротехника, 2019, №4, стр.32-41

О компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения с косинусными конденсаторами

МИХЕЕВ Г. М., АТАМАНОВ М.Н., АФАНАСЬЕВА О.В., ДРЕЙ Н.М.

Рассмотрены оптимальные условия для обеспечения необходимого значения коэффициента мощности в точке передачи электрической энергии в режиме компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения промышленных предприятий с малой

установленной мощностью электроприёмников. Исследованы резонансные явления в сети 6/10 кВ при применении косинусных конденсаторов. Выполнен анализ соответствия несинусоидальности напряжения нормам, установленным ГОСТ 32144-2013. Определены значения максимально допустимой расчетной мощности источника высших гармоник в зависимости от мощности короткого замыкания с учетом допустимой перегрузки конденсаторов токами высших гармоник, а также при условии соблюдения требований стандарта по гармоническому составу напряжения в точке передачи электрической энергии.

Ключевые слова: система электроснабжения, компенсация реактивной мощности, компенсирующие устройства, батарея конденсаторов, источник высших гармоник, гармонический состав.

The optimal conditions for providing the required value of the power factor at the point of electric energy transmission in the reactive power compensation mode in the small power supply system of industrial enterprises are considered. Possible resonant phenomena in the 6 (10) kV network in the case of using cosine capacitors are studied. The analysis of conformity of voltage non-sinusoidality to the norms established by GOST 32144-2013. For the operation mode of operation of the network, the values of the maximum permissible calculated power of the higher harmonics source depending on the short-circuit capacity are determined taking into account the permissible overloading of the capacitors by the harmonics currents, as well as provided that the requirements of the standard for the harmonic composition of the voltage at the point of transmission of electrical energy are met.

Key words: electrical power supply system, reactive-power compensation, compensating devices, capacitor bank, source of the higher-order harmonics, harmonic composition.

Электротехника, 2019, №4, стр.41-47

Анализ аппроксимаций кривых намагничивания для нелинейного расчета поля вихревых токов

ГЛЕБОВ А.О., КАРПОВ С.В., КАРПУШКИН С.В.

Моделирование полей вихревых токов в ферромагнитных материалах невозможно без информации о зависимости индукции магнитного поля от его напряженности – кривой намагничивания. Экспериментальное определение кривых намагничивания связано с

трудностями технического характера, а справочные данные содержат, как правило, небольшое число значений и непригодны для непосредственного использования. В связи с этим актуален переход от оригинальной кривой намагничивания к ее аппроксимации. В статье рассмотрены три наиболее популярных в расчетной практике способа аппроксимации кривых намагничивания: аппроксимация Фрелиха, аппроксимация Мельгуя и универсальная аппроксимация Пентегова. В качестве критериев эффективности аппроксимации приняты среднеквадратическое отклонение от оригинальной кривой намагничивания, различие средних плотностей магнитных коэнергий, а также погрешность расчета активной мощности. Для сравнительного анализа аппроксимаций использованы экспериментальные кривые намагничивания материалов с различными магнитными свойствами. Показано, что наименьшая погрешность расчета полей вихревых токов обеспечивается при использовании универсальной аппроксимации. Замена кривой намагничивания другими аппроксимациями может приводить к погрешностям расчета активной мощности свыше 15%. Результаты исследования могут быть использованы для проведения нелинейного конечно-элементного анализа поля вихревых токов в ферромагнитных материалах.

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, кривая намагничивания, вихревые токи, конечно-элементный анализ.

Simulation of the eddy current fields in ferromagnetic materials is impossible without information about the dependence of magnetic field induction on its intensity (the magnetization curve). Experimental definition of magnetization curves encounters technical difficulties, and reference data usually contains a small number of values and are not suitable for direct application. In this regard the transition from original magnetization curve to its approximation is relevant. The purpose of a research is to select the optimal method for approximating the magnetization curves from the three most popular ones in the calculation practice: Frolich, Melgui and universal Pentegov approximations. The standard deviation from the original magnetization curve, the difference in the average densities of the magnetic coenergy, as well as the error in calculating the active power, were used as criteria for the efficiency of the approximation. The experimental data about magnetization of materials with different properties was used for comparative analysis. It is shown that the minimum error in calculation of eddy currents fields is provided by universal approximation. A replacement of magnetization curve by other approximations can lead to increasing of active power error up to 15%. The obtained results can be used for the nonlinear finite element analysis of eddy currents field in

ferromagnetic materials.

Key words: ferromagnetic materials, magnetization curve, eddy currents, finite element analysis.

Электротехника, 2019, №4, стр.48-54

Идентификация дефектов трансформаторов по анализу газов, растворенных в масле
ДАВИДЕНКО И.В., ОВЧИННИКОВ К.В.

Приведено описание практически всех актуальных и широко используемых методов интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов (АРГ), а также описан новый метод идентификации вида дефекта, алгоритм его применения, указаны преимущества перед другими методами. Приведены методика тестирования достоверности методов интерпретации АРГ и результаты тестирования этих методов. Выполнено сравнение качества определения различных типов дефектов рассматриваемыми методами. Во время тестирования особое внимание уделялось решению проблемы, которая заключается в том, что различные методы интерпретации результатов АРГ идентифицируют различное число видов дефектов. Оценка качества методов и тестирование их достоверности проводились на тестовой выборке, содержащей 134 случая повреждений трансформаторов. Для каждого случая имеется подробное описание процесса развития дефекта (результаты анализов и испытания трансформатора за предшествующий период, записи из эксплуатационной документации), а также результаты вскрытия трансформатора, в ходе которого установлена причина его повреждения.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, идентификация дефектов, анализ растворенных в масле газов.

The description of practically all actual and widely used methods of interpretation of results of the analysis of the dissolved gases in oil (DGA) is resulted, and also the new method of identification of a type of defect, algorithm of its application is described, advantages before other methods are specified. The methods of testing the validity of DGA interpretation methods and the results of testing these methods are presented. Comparison of the quality of the determination of various types of defects by the methods considered is given. During testing special attention was paid to solving the problem, which is that different methods of interpretation of the results of the DGA identified a different number of defects type. Quality

assessment techniques and test of reliability was conducted on a test set, which consists of 134 cases of damage to transformers. For each case the authors have a detailed description of the defect development process (the results of analyses and testing of the transformer for the prior period, recording of operational documentation), as well as opening during which the cause of the transformer damage was established.

Key words: power transformers, fault type identification, analysis of dissolved gases in oil.

Электротехника, 2019, №4, стр.54-58

Неитерационный метод решения нелинейных уравнений установившихся режимов электрических сетей

ПРЯШНИКОВА П.Ф.

Важной частью проектирования и эксплуатации электрических сетей является решение линейных и нелинейных уравнений установившихся режимов. Для решения линейных уравнений таких режимов в настоящее время используются аналитические и итерационные методы, для решения нелинейных уравнений используются только итерационные методы, обычно – метод Ньютона-Рафсона. Все итерационные методы имеют два существенных недостатка. Во-первых, итерационный процесс может расходиться, причем расходимость зависит от формы записи нелинейного уравнения и от выбора начального приближения. Во-вторых, в случае сходимости для каждого начального приближения итерационный метод дает возможность найти только одно решение, в то время как нелинейные уравнения могут иметь несколько решений, соответствующих различным режимам электрической сети. Актуальной является задача разработки методов, свободных от этих недостатков. В статье предлагается неитерационный метод решения нелинейных уравнений установившихся режимов электрических сетей, записанных в комплексном виде. Метод основан на использовании результата для преобразования системы нелинейных уравнений к множеству многочленов. Многочлены строятся таким образом, что нули каждого из них определяют одну из координат вектора решений системы нелинейных уравнений. Тем самым задача решения системы нелинейных уравнений установившихся режимов сводится к задаче поиска нулей многочленов одной переменной. Для поиска нулей существуют многочисленные методы, не требующие задания начальных приближений и позволяющие найти все нули. Эффективность применения предложенного метода проиллюстрирована решением уравнений узловых напряжений сети в форме баланса мощностей. Решение

уравнений итерационным и предложенным методами осуществлялось с помощью программы MathCAD-15. Проиллюстрирована расходимость итерационного метода при некоторых значениях начальных приближений и отсутствие возможности определения всех решений. Неитерационным методом найдены два решения и установлено, что других решений нет. Дальнейшее развитие предложенного метода связано с учетом разреженности матрицы проводимостей электрических сетей, что позволит уменьшить степени используемых многочленов, а также с распространением метода на уравнения вещественной области, записанные в алгебраической и тригонометрической форме.

Ключевые слова: электрическая сеть, установившийся режим, нелинейные уравнения, неитерационный метод решения.

An important part of the design and operation of electrical networks is the solution of linear and nonlinear power flow equations. To solve the linear equations, analytical and iteration methods are currently used, only iterative methods are used to solve nonlinear equations, usually the Newton-Raphson method. All the iterative methods have two significant drawbacks. First, the iterative process may diverge, and the divergence of the iterative process depends both on the form of the nonlinear equation and on the choice of the initial approximation. Secondly, in the case of convergence for each initial approximation, the iterative method makes it possible to find only one solution, while nonlinear equations can have several solutions corresponding to different modes of the electric network. The actual task is to develop methods that are free from these shortcomings. The paper propose not an iterative method for solving nonlinear power flow equations recorded in a complex form. The method is based on the use of the resultant to transform a system of nonlinear equations to a set of polynomials. The polynomials are constructed in such a way that the zeros of each of them determine one of the coordinates of the solution vector of the system of nonlinear equations. Thus, the problem of solving a system of nonlinear equations reduces to the problem of finding zeros of polynomials of one variable. To find the zeros of polynomials, there are numerous methods that do not require the specification of initial approximations and allow finding all zeros. The effectiveness of the proposed method is illustrated by the solution of the equations of node network voltages in the form of a power balance. The solution of the equations by the traditional iterative method and the method proposed in the work was carried out using the MathCAD-15 program. The divergence of the iteration method is illustrated for certain values of the initial approximations and the absence of the possibility of determining all the solutions. Not the iterative method proposed in the work, two solutions are found and it is established that there are no other solutions. Further

development of the proposed method is connected with the allowance for the sparseness of the conductivity matrix of electric networks, which will allow to reduce the degree of polynomials used, as well as the extension of the method to the equations of the real domain, written down in algebraic and trigonometric form.

Ключевые слова: power flow, nonlinear equations, not an iterative method of solution.

Электротехника, 2019, №4, стр.58-63

Устройство защиты от коммутационных перенапряжений в тяговых сетях постоянного тока

АЛФЕРОВ Д.Ф., ЕВСИН Д.В., ЦХАЙ Е.В.

Предложена схема автоматического разрядного устройства защиты от коммутационных перенапряжений на основе управляемого вакуумного разрядника. Разрядное устройство предназначено для шунтирования реактора тяговой подстанции и индуктивности тяговой сети постоянного тока при возникновении коммутационных перенапряжений, сопровождающих отключение тока. Приводятся результаты экспериментального исследования и моделирования коммутационных характеристик такого устройства.

Ключевые слова: тяговые сети постоянного тока, коммутационные перенапряжения, устройства защиты.

A scheme of an automatic discharge device for protection against switching overvoltages based on a controlled vacuum discharger is proposed. The discharge device is designed for shunting the reactor of the traction substation and inductance of the DC traction network in the event of switching overvoltages accompanying the current shutdown. The results of experimental research and simulation of switching characteristics of such a device are presented.

Key words: DC traction networks, switching overvoltages, security devices.

Электротехника, 2019, №4, стр.63-66

Электронно-регулируемый амортизатор

САРБАЕВ В.И., ГАРМАШ Ю.В., БЛИННИКОВА Л.Г.

Рассмотрено устройство управления электронным автомобильным амортизатором, реализующее энергоэффективный способ экономии топлива и позволяющее регулировать жесткость подвески в зависимости от условий движения автомобиля и его поддресоренной массы. Указанные регулировки могут осуществляться в автоматическом режиме. Энергия, генерируемая при перемещении поршня амортизатора, используется для зарядки аккумулятора. Применение импульсного преобразователя электрической энергии позволяет получить уровень напряжения, оптимальный для батареи.

Ключевые слова: подвеска автомобиля, амортизатор, электрооборудование автомобиля, система управления, микроконтроллер.

A device control electronic automotive shock absorber implementing an energy efficient way of fuel economy and allows to adjust the stiffness of the suspension depending on driving conditions of the vehicle sprung mass. These adjustments can be carried out in automatic mode. The energy generated by the movement of the piston of the shock absorber, is used to charge the battery. The use of a pulse Converter of electric energy allows to obtain a voltage level that is optimal for the battery.

Key words: car suspension, shock absorber, the vehicle's electrical system, control system, microcontroller.