

Содержание

Электротехника, 2021, №11, стр. 2-8

Мультиагентный подход к моделированию систем электроснабжения с распределенной генерацией

ПАВЛОВ Н.В., ПЕТРОЧЕНКОВ А.Б., РОМОДИН А.В.

Статья посвящена моделированию систем электроснабжения с распределенной генерацией при номинальных режимах с использованием мультиагентного подхода. Для решения поставленных задач использованы методы моделирования в программном пакете *LabVIEW*, который ориентирован на работу с виртуальными приборами, агентами, представляемыми как автономные компьютерные программы, взаимодействие между которыми может быть применено на практике в рамках концепции *MicroGrid* и цифровых подстанций. Основная цель реализации такого подхода – обеспечение самонастройки системы в случае реконфигурации сети. Для оценки его работоспособности разработана модель газотурбинной электростанции, используемой для утилизации попутного газа. На основе известных способов расчета и схемы замещения, при том же оборудовании эффективность отрасли увеличивается благодаря оптимизации процессов управления оборудованием и повышению эффективности взаимодействия электрических и технологических процессов.

Ключевые слова: система электроснабжения, распределенная генерация, газотурбинная электростанция, утилизация попутного газа, мультиагентный подход, моделирование.

The article is devoted to the modeling of power supply systems with distributed generation at nominal modes using a multi-agent approach. To solve these tasks, we used modeling methods in the LabVIEW software package, which is focused on working with virtual devices, agents represented as autonomous computer programs, the interaction between which can be applied in practice within the framework of the MicroGrid concept and digital substations. The main goal of implementing this approach is to ensure self-tuning of the system in the case of network reconfiguration. To assess its performance, a model of a gas turbine power plant used for the utilization of associated gas has been developed. Based on the known calculation methods and substitution schemes, with the same equipment, the efficiency of the industry increases due to

the optimization of equipment management processes and increasing the efficiency of interaction between electrical and technological processes.

Key words: power supply system, distributed generation, gas turbine power plant, associated gas utilization, multi-agent approach, modeling.

Электротехника, 2021, №11, стр. 9-14

Методика расчета цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами для электропривода шлифовального станка

КОРОТАЕВ А.Д., ЖУЖГОВ Н.В., ЧАБАНОВ Е.А., КЛЮЧНИКОВ А.Т., ПОГУДИН А.Л., КУЛЕШОВ П.В.

Рассмотрена методика расчета параметров и характеристик цилиндрического линейного вентильного двигателя для исполнительного механизма шлифовального станка.

Определены параметры и характеристики эскизного модуля двигателя, который в составе электропривода шлифовального станка обеспечивает необходимое рабочее усилие, формируя при этом возвратно-поступательное движение вторичного элемента. Также рассмотрены различные варианты исполнения цилиндрического линейного вентильного двигателя, который в зависимости от его конструктивных особенностей, способен обеспечивать тяговое усилие модуля двигателя в широком диапазоне.

Ключевые слова: шлифовальный станок, цилиндрический линейный вентильный двигатель, постоянные магниты, индуктор, тяговое усилие.

The article describes a method for calculating the parameters and characteristics of a cylindrical linear valve motor for an actuator of a grinding machine. The parameters and characteristics of the draft engine module were determined, which, as part of the electric drive of the grinding machine, provides the necessary working force, while forming the reciprocating movement of the secondary element. Also considered are various versions of the cylindrical linear valve motor, which, depending on its design features, is capable of providing the traction force of the engine module in a wide range.

Key words: grinding machine, cylindrical linear valve motor, permanent magnets, inductor, tractive effort.

Векторно-матричное управление синхронного компенсатора

ХИЖНЯКОВ Ю.Н., ЮЖАКОВ А.А., СТОРОЖЕВ С.А., НИКУЛИН В.С.

Для совершенствования электроснабжения промышленных предприятий требуется эффективное использование линий электропередач. Передаваемая по линии активная мощность необходима для совершения работы асинхронными двигателями, компенсации тепловых потерь в линиях передач и т.д.; реактивная мощность необходима для создания электромагнитных полей в асинхронных двигателях, насыщенных реакторах, трансформаторах и т.д. Передача электроэнергии происходит с потерями, что ведет к дополнительным экономическим затратам. Предлагается вырабатывать необходимую реактивную мощность на месте потребления с помощью синхронных компенсаторов, разгрузив при этом линию передач. Для стабилизации напряжения в узле нагрузки необходимо регулировать ток возбуждения синхронного компенсатора с целью генерирования необходимой реактивной (емкостной) мощности для компенсации индуктивной (реактивной) мощности. Стабилизация напряжения в узле исключает изменение тока в линии передач из-за возможного нарушения баланса реактивной мощности. Предлагается регулировать ток возбуждения синхронного компенсатора с помощью предикатного нечеткого регулятора напряжения. В состав такого регулятора входит фаззификатор, блок нечеткого вывода с реализацией алгоритма Мамдани и дефаззификатор (метод разности площадей).

Ключевые слова: синхронный компенсатор, фаззификатор, предикаты, нечеткая импликация, нормализатор, метод разности площадей.

To improve the power supply of industrial enterprises, the effective use of power transmission lines is required. The active power transmitted through the line is necessary for the operation of asynchronous motors, compensation of heat losses in transmission lines, etc.; reactive power is necessary for the creation of electromagnetic fields in asynchronous motors, saturated reactors, transformers, etc. The transmission of electricity occurs with losses, which leads to additional economic costs. It is proposed to generate the necessary reactive power at the place of consumption using synchronous compensators, while unloading the transmission line. To stabilize the voltage in the load node, it is necessary to regulate the excitation current of the synchronous compensator in order to generate the necessary reactive (capacitive) power to compensate for the inductive (reactive) power. Voltage stabilization in the node excludes a

change in the current in the transmission line due to a possible violation of the reactive power balance. It is proposed to regulate the excitation current of the synchronous compensator using a predicate fuzzy voltage regulator. Such a controller includes a fuzzifier, a fuzzy output block with the implementation of the Mamdani algorithm and a defuzzifier (the area difference method).

Key words: synchronous compensator, fuzzifier, predicates, fuzzy implication, normalizer, area difference method.

Электротехника, 2021, №11, стр. 19-23

Экспериментальное определение тока нагрузки кабелей с бумажной пропитанной изоляцией в установившемся тепловом режиме

КУХАРЧУК И.Б., ТЕРЛЫЧ А.Е., ТРУФАНОВА Н.М.

Выполнено экспериментальное исследование нагрева кабелей с бумажной пропитанной изоляцией и жилами из алюминиевого сплава сечением 70, 95 и 120 мм². Описана схема подачи и измерения электрического тока с помощью лабораторного автотрансформатора и трансформатора тока. Описана схема измерения температуры на различных частях конструкции кабелей. Определены токи нагрузки, при которых температура жилы кабелей достигает значений 90 и 95° С. Для этих стационарных режимов измерены температуры на поверхностях жил, металлических оболочек и кабелей. Определены сопротивления токопроводящих жил для отрезков кабелей, проведен перерасчет сопротивлений для температуры 20 ° С и длины кабеля 1 км с целью сравнения с данными, указанными в ГОСТ. Рассчитана мощность тепловых потерь в токопроводящих жилах при протекании заданного электрического тока. С помощью тепловой схемы замещения кабеля рассчитаны тепловые сопротивления изоляции и воздуха для рассмотренных нагрузочных режимов, а также удельное тепловое сопротивление и удельная теплопроводность изоляции. Построена математическая модель процессов тепломассопереноса при проведении одного из этапов эксперимента. Для проверки адекватности модели определена разница между температурой жилы кабеля, полученной с помощью численного метода, и определенной экспериментально.

Ключевые слова: кабель с бумажной пропитанной изоляцией, ток нагрузки, тепловой режим, сопротивление жилы, тепловое сопротивление, моделирование.

An experimental study of heating of cables with paper impregnated insulation and aluminum alloy cores with a cross section of 70, 95 and 120 mm² was performed. A scheme for supplying and measuring electric current using a laboratory autotransformer and a current transformer is described. The scheme of temperature measurement on various parts of the cable structure is described. The load currents at which the temperature of the cable core reaches the values of 90 and 95 ° C are determined. For these stationary modes, temperatures were measured on the surfaces of cores, metal shells and cables. The resistances of the conductive cores for cable segments were determined, the resistances were recalculated for a temperature of 20 ° C and a cable length of 1 km in order to compare with the data specified in national standard. The power of heat losses in conductive veins during the flow of a given electric current is calculated. The thermal resistances of insulation and air for the considered load conditions, as well as the specific thermal resistance and the specific thermal conductivity of the insulation are calculated using the thermal replacement circuit of the cable. A mathematical model of heat and mass transfer processes during one of the stages of the experiment is constructed. To verify the adequacy of the model, the difference between the temperature of the cable core obtained using the numerical method and determined experimentally is determined.

Key words: cable with paper impregnated insulation, load current, thermal mode, core resistance, thermal resistance, modeling.

Электротехника, 2021, №11, стр. 24-28

Определение сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей силовых кабелей с помощью математического моделирования электромагнитных процессов

ЩЕРБИНИН А.Г., НАУМОВ М.Д., СУББОТИН Е.В.

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей силовых кабелей используются при расчете токов коротких замыканий в электрических сетях. Эти параметры определяются с помощью математического моделирования электромагнитных процессов в кабеле. Для этого записывается дифференциальное уравнение в двухмерной постановке относительно продольной составляющей комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала, решение которого реализовано методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS Maxwell. В результате решения поставленной задачи вычисляется распределение магнитного поля в поперечном сечении кабеля и формируется матрица собственных активных и реактивных сопротивлений, с помощью которой

определяются сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей. Такой подход позволяет учитывать конструктивные особенности силовых кабелей, таких как форму и степень уплотнения многопроволочных токопроводящих жил, влияние поверхностного эффекта и эффекта близости. Сопротивления нулевой последовательности определяются для случая, когда ток короткого замыкания возвращается только через нулевую жилу. Исследование сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей проведено для силовых кабелей на напряжение 1 кВ с токопроводящими жилами круглой и секторной форм сечением от 95 до 240 мм². Рассматриваются кабели, в состав которых входят три основные и одна нулевая жилы, имеющая то же сечение, что и основные. Установлено, что применение секторных токопроводящих жил вместо круглых приводит к снижению исследуемых сопротивлений за счет снижения индуктивной составляющей. Проведено также исследование влияния степени уплотнения на сопротивления последовательностей для многопроволочных секторных токопроводящих жил.

Ключевые слова: силовой кабель, токопроводящие жилы, сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей, электромагнитные процессы, математическое моделирование.

The positive-, the negative and the zero-sequence impedances of power cables are used in the calculation of short-circuit currents in electrical networks. These parameters are determined by mathematical modeling of electromagnetic processes in the cable. For this, a differential equation is written in a two-dimensional formulation with respect to the complex amplitude longitudinal component of the vector magnetic potential, the solution of which is implemented by the finite element method in the ANSYS Maxwell software package. As a result of solving this problem, the distribution of the magnetic field in the cross-section of the cable is calculated and a matrix of its own active resistances and reactances is formed, with which the positive-, the negative and the zero-sequence impedances are determined. The application of this approach allows us to take into account the design features of power cables, such as the shape and degree of compaction of multiwire conducting cores, the influence of the surface effect and the proximity effect. The zero-sequence impedances are defined for the case where the short-circuit current is returned only through the zero core. The study of the positive-, the negative and the zero-sequence impedances was carried out for power cables at a voltage of 1 kV with conducting cores of round and sector shapes with a cross-section range from 95 mm² to 240 mm². Cables that consist of three main and one zero cores, which have the same cross-section as the main

ones are considered. It is established that the use of sector conducting cores instead of round leads to a decrease in the studied resistances due to a decrease in the inductive component. In addition, influence of the compaction degree on the sequence impedances for multi-wire sector conducting cores was studied.

Key words: power cable, current-conducting cores, the positive-, the negative and the zero-sequence impedances, electromagnetic processes, mathematical modeling.

Электротехника, 2021, №11, стр. 29-34

Метод косвенного измерения дебита установки электроприводного центробежного насоса

СОЛОДКИЙ Е.М., ПЕТРОЧЕНКОВ А.Б., ВИШНЯКОВ Д.Д., САЛЬНИКОВ С.В.

Представлен метод определения дебита установки электроприводного центробежного насоса без использования измерительного устройства (расходомера). Наблюдение параметра осуществляется при допущении о том, что известны переменные состояния погружного электродвигателя и каталожные характеристики установки. Рассмотрено математическое описание установки электроприводного центробежного насоса. Модель реализована в программной среде MATLAB Simulink. Представлены результаты моделирования, верификация модели установки и проверка адекватности алгоритма наблюдения параметра дебита. Наблюдатель технологического параметра использует принципы работы интегрального канала ПИД-регулятора и обратной связи по наблюдаемому параметру. Представлены структурные схемы, необходимые для реализации наблюдателя, и иллюстрации, описывающие работу алгоритма. Сфера применения наблюдателя не ограничивается работой с лабораторными стендами и средами моделирования; существует перспектива реализации на реальном объекте. К преимуществам предлагаемого метода наблюдения можно отнести простоту реализации, отсутствие алгоритмов, требующих больших вычислительных мощностей при воспроизведении на реальном оборудовании, и повышение аппаратурной надежности установки. Представленный алгоритм требует перехода от аналогового датчика, расположенного в устье скважины (манометра) к цифровому, что позволит решить проблему многозначности мощностной характеристики и идентифицировать рабочую точку.

Ключевые слова: механизированная нефтяная добыча, установка электроприводного

центробежного насоса, имитационное моделирование, наблюдение технологических параметров, электропривод.

A method for determining the flow rate of an electric centrifugal pump installation without using a measuring device (flow meter) is presented. The parameter is observed under the assumption that the variables of the state of the submersible electric motor and the catalog characteristics of the installation are known. The mathematical description of the installation of an electric centrifugal pump is considered. The model is implemented in the MATLAB Simulink software environment. The results of modeling, verification of the installation model and verification of the adequacy of the algorithm for observing the flow rate parameter are presented. The observer of the technological parameter uses the principles of operation of the integral channel of the PID controller and feedback on the observed parameter. The structural diagrams necessary for the implementation of the observer and illustrations describing the operation of the algorithm are presented. The scope of application of the observer is not limited to working with laboratory stands and modeling environments; there is a prospect of implementation on a real object. The advantages of the proposed observation method include the simplicity of implementation, the absence of algorithms that require large computing power when reproduced on real equipment, and an increase in the hardware reliability of the installation. The presented algorithm requires a transition from an analog sensor located at the wellhead (pressure gauge) to a digital one, which will solve the problem of ambiguity of the power characteristic and identify the working point.

Key words: artificial oil lifting, electrical submersible pump installation, imitative modeling, estimation of technological parameters, electric drive.

Электротехника, 2021, №11, стр. 34-38

Численные исследования процессов индукционно-резистивного электроподогрева трубопроводов

ДАВЫДОВА В.А., ЩЕРБИНИН А.Г., НАУМОВ М.Д., ЕРШОВ С.В.

Перекачка технологических жидкостей по трубопроводам при отрицательных температурах, как правило, требует наличия систем электроподогрева. Достаточно широкое распространения для обогрева длинных трубопроводов находит индукционно-резистивная система. Ее можно рассматривать как короткозамкнутую коаксиальную линию, внутренний проводник которой представляет собой одножильный кабель, а

внешний проводник – стальная труба, которая продольно крепится к обогреваемому трубопроводу. Трубопровод с индукционно-резистивной системой подогрева теплоизолируется. Для определения параметров электроподогрева необходимо на первом этапе определить тепловые потери в окружающую среду, далее, решив электромагнитную задачу, рассчитать токи, обеспечивающие подогрев трубопровода. Температурная задача описывается дифференциальным уравнением стационарной теплопроводности в двумерной постановке. Решение этой задачи в программном комплексе ANSYS Fluent определяет температурное поле и тепловые потери в окружающую среду. В результате численных исследований определено влияние диаметра трубопровода и толщины изоляции на уровень тепловых потерь. Также исследовано влияние снижения толщины слоя тепловой изоляции в области, где расположена система индукционно-резистивного нагрева (система ИРН), на рост тепловых потерь. Электромагнитные процессы описываются дифференциальным уравнением Пуассона относительно векторного магнитного потенциала в двумерной постановке. В результате решением этой задачи в программном комплексе Ansys Maxwell методом конечных элементов вычисляются активное и реактивное сопротивления системы ИРН, по которым определяется рабочий ток, обеспечивающий подогрев трубопровода. Установлено, что местоположение кабеля в стальной трубе индукционно-резистивной системы не оказывает значимого влияния на ее параметры. Таким образом, предложенный подход можно использовать для определения эксплуатационных характеристик системы ИРН.

Ключевые слова: трубопровод, система индукционно-резистивного нагрева, электроподогрев трубопроводов, математическое моделирование тепловых и электромагнитных процессов.

Pumping process fluids through pipelines at subzero temperatures, as a rule, requires the presence of electric heating systems. An induction-resistive system is widely used for heating long pipelines. It can be considered as a short-circuited coaxial line, the inner conductor of which is a single-core cable, and the outer conductor is a steel pipe that is longitudinally attached to the heated pipeline. The pipeline with an induction-resistive heating system is insulated. To determine the parameters of electric heating, it is necessary at the first stage to determine the heat losses to the environment, then, having solved the electromagnetic problem, calculate the currents that provide heating of the pipeline. The temperature problem is described by the differential equation of stationary thermal conductivity in a two-dimensional formulation. The solution of this problem in the ANSYS Fluent software package determines the temperature field

and heat losses to the environment. As a result of numerical studies, the influence of the pipeline diameter and insulation thickness on the level of heat losses has been determined. The effect of reducing the thickness of the thermal insulation layer in the area where the induction-resistive heating system (IRN system) is located on the growth of heat losses is also investigated.

Electromagnetic processes are described by the Poisson differential equation with respect to the vector magnetic potential in a two-dimensional formulation. As a result, by solving this problem in the Ansys Maxwell software package, the active and reactive resistances of the IRN system are calculated by the finite element method, which determine the operating current that provides heating of the pipeline. It is established that the location of the cable in the steel pipe of the induction-resistive system does not significantly affect its parameters. Thus, the proposed approach can be used to determine the operational characteristics of the IRN system.

Ключевые слова: pipelines, induction-resistive heating system, pipelines electric heating, mathematical modeling of thermal and electromagnetic processes.

Электротехника, 2021, №11, стр. 39-44

Уравнение электромагнитного поля в движущейся электропроводящей магнитно-анизотропной среде

КОРОТАЕВ А.Д., ЧАБАНОВ Е.А., ПОГУДИН А.Л., КУЛЕШОВ П.В.

В большинстве задач расчета электромагнитного поля целесообразно использовать векторный магнитный потенциал \vec{A} – вспомогательную функцию, для которой выполняется условие $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$. Согласно векторной алгебре $\text{div rot } \vec{A} = 0$, поэтому при расчете поля одно из основных условий $\text{div } \vec{B} = 0$ всегда выполняется. Ротор градиента любой скалярной величины равен нулю, поэтому в левую часть второго уравнения Максвелла вводится градиент произвольного скаляра. Производная по времени этого скаляра не является фактором, способным изменить магнитное и электрическое поля. Таким образом, с помощью основных уравнений электромагнитного поля его потенциалы могут быть определены с точностью, эквивалентной градиенту скаляра. Такая инвариантность называется калибровочной или градиентной. Для устранения этой неопределенности при нахождении потенциалов поля их подчиняют дополнительному условию, задаваемому специальной калибровкой. Для электромагнитного поля, которое распространяется в вакууме, известна калибровка Лоренца; для электропроводящей среды эта калибровка теряет смысл. При выборе калибровки для электропроводящих сред

необходимо обеспечить выполнение условия $\operatorname{div} \bar{J} = 0$, поэтому целесообразно использовать его в качестве калибровочного. В статье показано, что при решении одномерной задачи $\operatorname{div} \bar{A}$ можно принять равным нулю, однако при решении двухмерных или трехмерных задач необходима специальная калибровка потенциального поля. В статье предлагается в качестве калибровки использовать условие $\operatorname{div} \bar{J} = 0$, так как оно выполняется для всех электропроводящих сред.

Ключевые слова: линейный асинхронный двигатель, магнитно-анизотропная среда, электропроводящая среда, электромагнитное поле, калибровка, расчет.

In most problems of calculating the electromagnetic field, it is advisable to use the vector magnetic potential – an auxiliary function for which the condition is fulfilled. According to vector algebra, therefore, when calculating the field, one of the main conditions is always met. The gradient rotor of any scalar value is zero, so the gradient of an arbitrary scalar is introduced into the left part of the second Maxwell equation. The time derivative of this scalar is not a factor that can change the magnetic and electric fields. Thus, using the basic equations of the electromagnetic field, its potentials can be determined with an accuracy equivalent to the scalar gradient. Such invariance is called gauge or gradient invariance. To eliminate this uncertainty when finding the field potentials, they are subjected to an additional condition set by a special calibration. For an electromagnetic field that propagates in a vacuum, the Lorentz calibration is known; for an electrically conducting medium, this calibration loses its meaning. When choosing a calibration for electrically conductive media, it is necessary to ensure that the condition is met, so it is advisable to use it as a calibration one. The article shows that when solving a one-dimensional problem, it can be assumed to be equal to zero, but when solving two-dimensional or three-dimensional problems, a special calibration of the potential field is necessary. The article suggests using the condition as a calibration, since it is fulfilled for all electrically conductive media.

Key words: linear induction motor, magnetic-anisotropic medium, electrically conducting medium, electromagnetic field, calibration, calculation.

Электротехника, 2021, №11, стр. 44-52

Диагностика работы технических средств по структуре их внешних электромагнитных полей

АПОЛЛОНСКИЙ С.М., ГОРСКИЙ А.Н.

Рассмотрены возможности диагностики работы технических средств по структуре их внешних электромагнитных полей. Сделан обзор существующих методов такой диагностики. Предложена принципиальная схема устройства диагностики по напряженностям внешних электромагнитных полей. Дан пример использования предлагаемого устройства диагностики. Рекомендованы аналогичные устройства для диагностики внешних физических полей технических средств.

Ключевые слова: физическое поле, электромагнитное поле, диагностика технических средств, схема устройства диагностики.

The possibilities of diagnosing the operation of technical means in the structure of their external electro-magnetic fields are considered. An overview of existing methods of such diagnostics is made. A schematic diagram of a diagnostic device based on the strengths of external electromagnetic fields is proposed. An example of using the proposed diagnostic device is given. Similar devices for diagnostics of external physical fields of technical means are recommended.

Key words: physical field, electromagnetic field, diagnostics of technical means, scheme of the diagnostic device.

Электротехника, 2021, №11, стр. 53-58

Новый метод обнаружения геомагнитно-индуцированных токов

СИВОКОНЬ В.П.

Показана возможность диагностики геомагнитно-индуцированных токов путем оценки вариаций гармоник в высоковольтных линиях электропередач. Установлено, что вариации четных гармоник напряжения (4-й, 6-й, 8-й) высоковольтных линий могут использоваться в качестве индикаторов геомагнитно-индуцированных токов. Лучшие результаты диагностики достигаются при использовании в качестве маркера 6-й гармоники напряжения высоковольтной линии электропередачи.

Ключевые слова: геомагнитно-индуцированные токи, высшие гармоники.

The possibility of diagnosing geomagnetic-induced currents by estimating harmonic variations in high-voltage power lines is shown. It is established that the variations of even voltage harmonics (4th, 6th, 8th) of high-voltage lines can be used as indicators of geomagnetic-induced currents. The best diagnostic results are achieved when using the 6th harmonic of the voltage of a high-

voltage power line as a marker.

Key words: geomagnetic-induced currents, higher harmonics.

Электротехника, 2021, №11, стр. 59-66

Разработка и исследование полупроводниковых регуляторов напряжения трансформаторов под нагрузкой для распределительных сетей

ПАНФИЛОВ Д.И., РОЖКОВ А.Н., ПЕТРОВ М.И., АСТАШЕВ М.Г., РАШИТОВ П.А., КРАСНОПЕРОВ Р.Н., ПАХОМОВ М.В.

В статье рассматривается принципиально новая технология регулирования и стабилизации напряжения, основанная на применении быстродействующих полупроводниковых устройств регулирования выходного напряжения трансформаторов под нагрузкой (ПУРНТ) на трансформаторных подстанциях (6÷20)/0,4 кВ. Рассмотрены основные этапы разработки и исследования технологии ПУРНТ, представлены различные варианты их схемотехнической реализации. Продемонстрированы особенности алгоритмов управления ПУРНТ в нормальных и аварийных режимах работы сети. Показаны основные принципы построения систем управления ПУРНТ. Исследовано функционирование ПУРНТ на физической модели в условиях максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие обоснованность предложенных технических решений и широкие функциональные возможности ПУРНТ. Отмечены перспективы применения предложенной технологии регулирования и стабилизации напряжения в составе действующих сетей.

Ключевые слова: полупроводниковый регулятор напряжения трансформаторов, активно-адаптивная электрическая сеть, качество электрической энергии, опытно-промышленный образец.

The article discusses a fundamentally new technology of voltage regulation and stabilization, based on the use of high-speed semiconductor devices for regulating the output voltage of transformers under load (PURNT) at transformer substations (6 ÷ 20) / 0,4 kV. The main stages of the development and research of the PURNT technology are considered, various types for their circuit are presented. The features of control algorithms of PURNT in normal and emergency modes of network operation are demonstrated. The basic principles of constructing

control systems of PURNT are shown. The functioning of PURNT was investigated on physical model under near real operating conditions. The results of experimental research are presented, confirming the validity of the proposed technical solutions and the wide functionality of the PURNT. Prospects for the application of the proposed technology for voltage regulation and stabilization in the composition of operating networks are noted.

Key words: semiconductor voltage regulator of transformers, active-adaptive electrical network, experimental research, prototype.

Электротехника, 2021, №11, стр. 67-71

Анализ виброакустических параметров электромеханических преобразователей на этапе проектирования

КРАМАРОВ А.С., БАТИЩЕВ Д.В., ПАВЛЕНКО А.В., БОЛЬШЕНКО И.А.

В программном комплексе ANSYS Mechanical методом конечных элементов разработан алгоритм численного моделирования механического соударения подвижных элементов электромагнитного привода, сопровождаемого вибрацией и акустическим шумом.

Представлены результаты расчета виброшумовых характеристик при различных подходах к описанию конструкции электромагнитного привода, полученные путем численного моделирования. Адекватность численных моделей и алгоритма расчета виброшумовых характеристик подтверждена экспериментально. Предложенный алгоритм позволяет оценить уровень шума привода на этапе проектирования, обеспечивая его соответствие установленным нормам.

Ключевые слова: электромагнитный привод, виброшумовые характеристики, численное моделирование.

An algorithm for numerical simulation of mechanical collision of moving elements of an electromagnetic drive, accompanied by vibration and acoustic noise, by the finite element method using the ANSYS Mechanical software package is proposed. The results of the calculation of vibration-noise characteristics for various approaches to the description of the electromagnetic drive design, obtained by numerical simulation, are presented. The adequacy of numerical models and the algorithm for calculating vibration-noise characteristics has been confirmed experimentally. The proposed algorithm makes it possible to estimate the noise level of the drive at the design stage, ensuring its compliance with established standards.

Key words: electromagnetic actuator, vibro-noise characteristics, numerical simulation.

Электротехника, 2021, №11, стр. 72-81

Оценка когерентности сигналов при анализе осциллограмм токов и напряжений промышленной частоты

КУЛИКОВ А.Л., ИЛЮШИН П.В., СЕВОСТЬЯНОВ А.А.

Децентрализация энергетики приводит к массовой интеграции в электроэнергетические системы разнородных объектов распределенной генерации, включая объекты на основе возобновляемых источников энергии, а также другого оборудования с элементами силовой электроники. Эти объекты оказывают существенное влияние на режимы функционирования систем, характер и параметры переходных процессов, показатели качества электрической энергии, в том числе, синусоидальность токов и напряжений. Широко применяемые алгоритмы оценки параметров токов и напряжений на основе дискретного преобразования Фурье при существенном отклонении показателей качества электроэнергии от нормируемых значений могут давать значительные ошибки. В таких условиях возникает необходимость в применении в измерительных органах интеллектуальных электронных устройств новых методов цифровой обработки сигналов. Обоснована необходимость применения адаптивной цифровой обработки сигналов для повышения точности оценок параметров сигналов промышленной частоты, позволяющей устранить или минимизировать влияние переходных процессов на анализируемые сигналы. Рассмотрена возможность использования методов статистического анализа, а также понятия когерентности сигналов при исследовании осциллограмм токов и напряжений в аварийных режимах. Для оценки когерентности сигналов промышленной частоты предложено применение авто- и взаимно корреляционных функций. Результатами имитационного моделирования подтверждена эффективность предложенного подхода для фиксации факта и момента начала переходного процесса. Предложена область применения адаптивной цифровой обработки сигналов токов и напряжений.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, распределенная генерация, аварийный режим, показатели качества электрической энергии, адаптивная цифровая обработка.

The decentralization of energy leads to the mass integration of heterogeneous distributed generation facilities, including facilities based on renewable energy sources, as well as other equipment with power electronics elements, into electric power systems. These objects have a significant impact on the modes of operation of systems, the nature and parameters of transients,

indicators of the quality of electrical energy, including the sinusoidality of currents and voltages. Widely used algorithms for estimating the parameters of currents and voltages based on the discrete Fourier transform with a significant deviation of the electric power quality indicators from the normalized values can give significant errors. In such conditions, there is a need to apply new methods of digital signal processing in the measuring bodies of intelligent electronic devices. The necessity of using adaptive digital signal processing to improve the accuracy of estimates of the parameters of industrial frequency signals, which allows to eliminate or minimize the influence of transients on the analyzed signals, is justified. The possibility of using methods of statistical analysis, as well as the concept of signal coherence in the study of current and voltage waveforms in emergency modes is considered. To assess the coherence of industrial frequency signals, the use of auto - and cross-correlation functions is proposed. The results of the simulation confirmed the effectiveness of the proposed approach for fixing the fact and the moment of the beginning of the transition process. The field of application of adaptive digital signal processing of currents and voltages is proposed.

Key words: electric power system, distributed generation, emergency mode, electric energy quality indicators, adaptive digital processing.

Электротехника, 2021, №11, стр. 82-90

Модели и алгоритмы прогнозирования нагрева асинхронного двигателя при изменении режимов его работы

ЕРШОВ М.С., ФЕОКТИСТОВ Е.А.

Представлена шестимассовая модель переходных процессов нагревания/охлаждения низковольтного асинхронного двигателя при изменении режимов его работы. Получено аналитическое решение модели, которое позволило установить закономерности регуляризации процессов нагрева. Кроме того, в программной среде MATLAB Simulink разработан цифровой вариант модели. На основании установленных закономерностей регуляризации процессов нагревания разработаны и в результате компьютерного моделирования апробированы алгоритмы расчета постоянных времени нагревания/охлаждения и заблаговременного прогнозирования установившейся температуры лобовых частей статорной обмотки статора по данным текущего контроля их температуры. Алгоритмы могут быть использованы в цифровых системах температурного контроля электрических машин.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, математическая модель нагревания/охлаждения, алгоритмы прогнозирования температуры.

There are a six-mass model of transient processes of heating and cooling of a low-voltage asynchronous motor when its operating modes change is developed. An analytical solution of the model was obtained, which allowed us to establish regularization patterns of heating processes. In addition, a digital version of the model has been developed in the MATLAB Simulink software environment. Based on the established regularization patterns of heating processes, algorithms for calculating the heating-cooling time constants and predicting the steady-state temperature of the front parts of the stator winding based on the current temperature control data were developed and tested as a result of computer modeling. The algorithms can be used in digital temperature control systems for electric machines.

Key words: asynchronous motor, mathematical model of heating-cooling, temperature prediction algorithms.

Электротехника, 2021, №11, стр. 91-93

Авторы номера

Электротехника, 2021, №11, стр. 94-95

Тубис Я.Б. (Некролог)