

Оценка энергетических характеристик асинхронизированного вентильного двигателя при различных способах аппроксимации кривой намагничивания
ТУТАЕВ Г.М., БОБРОВ М.А., ГУЛЯЕВ И.В.

В статье представлены результаты исследований влияния способа аппроксимации кривой намагничивания электротехнической стали и частоты возбуждения асинхронизированного вентильного двигателя (АВД) на его энергетические характеристики при реализации экстремальных по критериям энергосбережения алгоритмов управления. АВД представляет собой вариант двигателя двойного питания со статическими преобразователями частоты в цепях статора и ротора, применение которого в регулируемом электроприводе в максимальной степени удовлетворяет основным требованиям к машине переменного тока в отношении регулирования скорости и обеспечения высоких энергетических показателей. Показано, что применение кусочно-линейной аппроксимации тремя участками и сплайн-функцией позволяет получить уточненные значения энергетических характеристик по сравнению с простейшим вариантом аппроксимации двумя линейными участками за счет приближения к реальной кривой намагничивания, что обеспечивает при равных значениях электромагнитного момента более высокие значения потокосцепления с уменьшением тока намагничивания. Управление частотой возбуждения асинхронизированного вентильного двигателя при этом оказывает значительное влияние на потери в стали машины, которые в области малых нагрузок имеют определяющее значение относительно активных потерь в обмотках двигателя.

Ключевые слова: асинхронизированный вентильный двигатель, кривая намагничивания, способ аппроксимации, частота возбуждения, оценка энергетических характеристик.

The results of research of different magnetization curve approximation strategies of steel and excitation frequency of double inverter-fed induction motor influence at its energy performance by extremal control algorithms at energy saving criterion are presented in the article. Double inverter-fed induction motor is a variant of a double-fed motor with power frequency converters in the stator and rotor circuits the use of which in an adjustable speed electric drive to the maximum satisfies the requirements for an AC machine in relation of speed regulation and ensuring high energy performance. Using piecewise line approximation at three line sections and spline provides more accurate values of energy performance compared to the simplest strategy of the approximation by using two linear sections due to the approach at real magnetization curve

which ensures for equal values of the electromagnetic torque higher values of flux linkage with a decreasing of magnetization current. The control of excitation frequency of double inverter-fed induction motor has a significant influence on the steel losses of the machine which at low loads region are relatively prevail then resistance losses in the windings.

Key words: double inverter-fed induction motor, magnetization curve, approximation strategy, excitation frequency, evaluation of energy performance.

Электротехника, 06-2017, стр. 7-11

Исследование динамических характеристик активной системы виброзащиты объекта с изменяющимися параметрами

АБАКУМОВ А.М., ГУЛЯЕВ И.В., РАНДИН Д.Г.

В современной технике актуальной проблемой является защита механических объектов от вибрационных воздействий. Обсуждается задача повышения эффективности виброзащиты применительно к транспортным средствам. Приведены операторные уравнения, описывающие движение одномассовой системы активной виброзащиты с управляемым магнитореологическим демпфером. Рассмотрена математическая модель замкнутой системы с отрицательной обратной связью по виброускорению защищаемого объекта в виде структурной схемы. Синтезирован регулятор, обеспечивающий в определенном частотном диапазоне снижение виброускорений защищаемого объекта до заданного уровня. Путем сравнения динамических характеристик системы обоснована возможность упрощения регулятора без существенных потерь качества управления. На основе компьютерного моделирования проведено исследование динамических характеристик разомкнутой и замкнутой систем для гармонического возмущающего воздействия с учетом массы виброзащищаемого объекта. Дано описание экспериментального стенда для исследования динамических характеристик системы виброзащиты. Проведено экспериментальное исследование частотных характеристик активной системы виброзащиты. Сравнение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об адекватности разработанных моделей и принятых допущений. Показана возможность существенного повышения качества виброзащиты при использовании синтезированной системы.

Ключевые слова: магнитореологический демпфер, активная система виброзащиты, колебательная система, динамические характеристики, структурная схема, регулятор.

In the modern equipment an important problem is protection of mechanical objects against vibration influences. The task of increase in efficiency of vibration isolation system in relation to vehicles is discussed. The operator equations describing the movement of single-mass system of active vibration isolation system with the operated magnetorheological damper are given. The mathematical model of the closed system with negative feedback on vibration acceleration of the protected object in the form of the block diagram is considered. The regulator providing decrease to the set level of vibration accelerations of the protected object in the certain frequency range is synthesized. On the basis of comparison of dynamic characteristics of system the possibility of simplification of the regulator without essential losses of quality of control is proved. On the basis of computer modeling the research of dynamic characteristics of the opened and closed loop system for the harmonic disturbance taking into account variations of mass of the vibroprotected object is conducted. The description of the developed experimental stand for a research of dynamic characteristics of system of vibration isolation system is given. Experimental research of frequency characteristics of active vibration isolation system is conducted. Comparison of theoretical and experimental data testifies to adequacy of the developed models and the accepted assumptions. The possibility of essential improvement of quality of vibration isolation system when using of the synthesized system is shown.

Keywords: magnetorheological damper, active vibration isolation system, oscillatory system, dynamic characteristics, schematic block diagram, regulator.

Электротехника, 06-2017, стр. 12-16

Энергоэффективность высоковольтного электропривода компрессорных установок нефтегазового комплекса

САДИКОВ Д.Г., ТИТОВ В.Г., ОНИЩЕНКО Г.Б., ГУЛЯЕВ И.В.

Структура и масштаб потребления топливно-энергетических ресурсов в газовой промышленности свидетельствует о том, что наибольшая доля энергоресурсов приходится на магистральный транспорт газа из районов добычи в центральные промышленные регионы России. Таким образом, проблема снижения затрат энергоресурсов в отрасли в первую очередь актуальна для магистральных газопроводов и прежде всего компрессорных станций, как основных потребителей топливно-энергетических ресурсов. В статье рассматриваются перспективные способы повышения энергетической

эффективности компрессорных агрегатов с центробежными нагнетателями с помощью частотно-регулируемого высоковольтного электропривода. Проведены сравнение и выбор оптимальной структуры построения силовых электрических схем преобразователей частоты. С помощью компьютерного моделирования показано, что схема каскадного многоуровневого преобразователя частоты обладает лучшими характеристиками по сравнению с аналогами. Рассмотрено влияние преобразователей частоты на питающую сеть. На основе компьютерной модели системы проведено сравнение различных алгоритмов управления каскадным многоуровневым преобразователем частоты. Показано, что для обеспечения наилучших энергетических характеристик такого преобразователя наиболее перспективно применение алгоритма пространственной модуляции базовых векторов. Сформулирован перечень технических решений, направленный на повышение показателей энергоэффективности работы компрессорной станции. Выполнен расчет показателей энергоэффективности применяемых технических решений.

Ключевые слова: компрессорная установка, энергоэффективность, каскадный многоуровневый преобразователь частоты, векторный алгоритм управления.

Structure and volume of fuel and energy resource consumption on gas industry shows that energy are used mostly for gas transportation from faraway districts to central industrial ones of Russia. Thus, a problem of cost reduction in the industry is actual for gas pipelines as main consumers of fuel and energy resources. Ways of energy efficiency increasing for compressor units with centrifugal supercharger by using high voltage electrical drives with frequency converters are considered in this article. Comparison and choice of the rational design of electrical diagrams are shown. With help of computer modeling It is proven that a diagram of cascade multilevel frequency converter has better properties in comparison with high voltage electrical drive analogues. Frequency converter's influence on feed source was considered as well. On basis of the developed computer model there are introduced different types of algorithms of cascade multilevel frequency converter control. It is shown that to provide the best electrical characteristics of cascade multilevel frequency converter it is more prospectively to use an algorithm of space modulation of base vectors. A list of technical solutions for increasing indications of booster station's energy efficiency was made as well as calculations for technical solutions' energy efficiency.

Key words: compressor unit, energy efficiency, cascaded multilevel inverter, vector control algorithm.

Электротехника, 06-2017, стр. 17-22

Выбор силовых полупроводниковых приборов для параллельного соединения

ИЛЬИН М.В., БЕСПАЛОВ Н.Н., КАПИТОНОВ С.С., ГУЛЯЕВ И.В.

Рассмотрены способы подбора силовых полупроводниковых приборов для группового параллельного соединения на основе моделей, разработанных на основе измеренных электрических и тепловых параметров и характеристик конкретных приборов.

Экспериментальные данные получены с помощью испытательного оборудования АД ИП-6. Электрическая часть модели сформирована на основе электрических параметров вольтамперной характеристики в состоянии высокой проводимости, тепловая часть разработана на основе метода электротепловой аналогии. Параметры тепловой модели определены на базе измеренного значения теплового сопротивления переход-корпус в установившемся тепловом режиме. Электрическая и тепловая части модели связаны через температурные зависимости параметров вольтамперной характеристики. В качестве примера рассматривается выборка из десяти силовых диодов, из которых составлены параллельные соединения, состоящие из двух диодов, и проанализированы электрические и тепловые процессы в группе методом моделирования для всех возможных комбинаций диодов. На основании результатов моделирования выявлены потенциально надёжные и ненадёжные комбинации диодов. За критерий оценки надёжности принята температура полупроводниковой структуры. Потенциально надёжным соединением считалось такое, у которого температура полупроводниковых структур приборов, входящих в соединение, не превышала предельно допустимого значения. В качестве примера рассмотрены два соединения, которые отнесены к потенциально надёжному и потенциально ненадёжному соединению.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, параллельное соединение, моделирование, надёжность, переходной процесс, электротепловая модель.

The article describes the approach to the selection of power semiconductor devices for group parallel connection based on simulation. Models based on experimentally measured electrical and thermal parameters and characteristics of specific devices were used for simulating. The experimental data were obtained using the ADIP-6 test equipment. The electrical part of the model is formed on the basis of electrical parameters of the current-voltage characteristic in a state of high conductivity. The thermal part of the model is developed on the basis of the analogy of thermal processes to electrical processes. The parameters of the thermal model are determined

on the basis of the measured value of the thermal resistance of the junction-case in the steady-state thermal mode. The electrical and thermal parts of the model are connected by the temperature dependences of the parameters of the current-voltage characteristic. As an example, we consider a sample of ten power diodes, which are consisted parallel connections of two diodes, the electrical and thermal processes in the group are analyzed by simulation for all possible combinations of diodes. Based on the simulation results, potentially reliable and unreliable combinations of diodes are identified. The criterion for estimating the potential reliability was the temperature of the semiconductor structure. Potentially reliable connection was considered to be the connection in which the temperature of the semiconductor structures of the devices entering the connection did not exceed the maximum acceptable value. For comparison, the article describes two connections that are classified as potentially reliable and potentially unreliable connections.

Key words: power semiconductor device, parallel connection, simulation, reliability, transient process, electric model, thermal model.

Электротехника, 06-2017, стр. 22-26

Система управления электромагнитным подшипником

ГУЛЯЕВ И.В., ДАРЬЕНКОВ А.Б., КУЗМЕНКОВ А.Н., ТИТОВ В.Г.

Предложена трехконтурная система управления радиальным электромагнитным подшипником для мощных вращающихся агрегатов, рабочие зазоры в которых между статором и ротором составляют десятые доли миллиметра при весе ротора около одной тонны. В разомкнутом состоянии система является неустойчивой и обладает особенностями, которые необходимо учитывать при синтезе регуляторов. Построение системы управления осуществляется в соответствии с общими принципами, характерными для систем подчиненного регулирования. Рассмотрены вопросы построения импульсной системы управления и различные варианты построения внутреннего контура тока. Для расчета параметров регуляторов использовались метод передаточных функций и метод z-преобразования. На начальном этапе исследовался внутренний контур тока; показано, что наиболее рациональным является построение контура тока ЭМП с релейным регулятором, работающим в скользящем режиме. В соответствии с математической моделью электромагнитного подшипника и соответствующими ей структурными схемами построены имитационные модели в программном комплексе Matlab Simulink. В результате моделирования импульсной

системы управления электромагнитным подшипником получены осциллограммы переходных процессов по управляющему и возмущающему воздействиям. Анализ переходных процессов при моделировании показал, что электромагнитные подшипники, оснащенные трехконтурной системой управления, обладают большой статической жесткостью и высоким быстродействием. Полученные результаты использованы при построении системы управления электромагнитным подшипником газового нагнетателя компрессорной станции «Помарская».

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, трехконтурная система управления, контур тока, релейный регулятор, импульсная система управления, метод z-преобразования.

A three-loop control system of radial electromagnetic bearing for powerful rotating machines is proposed, where the working clearances between the stator and rotor make tenths of a millimeter with the rotor weight of about one ton. In the open state the system is unstable and has the features, which must be considered while synthesizing the regulator. Issues of creating a pulse system and different variants of constructing the inner current circuit are considered. The construction of the control system is carried out in accordance with the general principles of building systems of subordinate regulation. To calculate the parameters of regulators used the method of transfer functions and z-transformation method. It is shown that the best performance in speed and overshoot has a relay regulator operating in sliding mode. At the initial stage, the internal circuit of the current was investigated, it is shown that the most rational is the construction of the EMB current loop with a relay regulator operating in a sliding mode. In accordance with the mathematical model of EMB and its corresponding structural diagrams, simulation models are built in Matlab Simulink software package. In the result of simulating a pulsed electromagnetic bearing control system, transient processes on control and disturbance impacts are obtained. Analysis of transient processes in simulation showed that electromagnetic bearings equipped with a three-loop control system have a high static rigidity and high operating speed. The acquired results are utilized while building up a system of controlling the electromagnetic bearing of a gas pressurizer in «Pomarskaya» compressor station.

Key words: electromagnetic bearing, three-loop control system, pulse control system, current loop, relay controller, z-transformation method.

Определение индуктивностей синхронной реактивной машины для бездатчикового управления

ЛАПШИНА В.А., ПОПОВ А.А., ГУЛЯЕВ И.В.

Более двух десятилетий задача по исключению датчиков положения ротора в приводах переменного тока остается актуальной. Среди ожидаемых преимуществ от ее решения – снижение стоимости и размеров привода, а также повышение надежности. Методы, разработанные для достижения этой цели, обычно называются бездатчиковым управлением. Для машин переменного тока эти методы обеспечивают высокую производительность в диапазоне средних и высоких скоростей, однако их эффективность падает с уменьшением скорости, а управление положением на низких и близких к нулю скоростях не представляется возможным. Для преодоления этого ограничения были предложены методы бездатчикового управления, основанные на отслеживании положения асимметрии ротора. Эти методы измеряют реакцию машины на высокочастотную составляющую сигнала возбуждения. Одно из наиболее привлекательных свойств этого метода – отсутствие ограничений при работе на низких или близких к нулю скоростях, что позволяет управлять положением ротора. В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований метода определения индуктивностей L_d и L_q синхронной реактивной машины (СРМ) с применением инжекции высокочастотной составляющей в напряжение статора. Рассмотрены принципы работы данного метода и его применение на математической модели СРМ и двигателе М3АL 90LDA 4 компании АВВ. Определение этих параметров необходимо для реализации систем бездатчикового управления электроприводом.

Ключевые слова: синхронная реактивная машина, бездатчиковое управление, моделирование в среде MatLab, определение индуктивностей, обработка высокочастотных сигналов.

The task of eliminating rotor position sensors in AC drives has been the focus of intensive research for over two decades. Among the expected benefits of the solution to this problem – reduction of driver's cost and size, as well as its increased reliability. The methods developed for this purpose, are usually called sensorless control. It has been shown that the sensorless control methods for ac machines provide high efficiency at medium and high speeds. However, the performance of these methods is less efficient with decreasing speed, and control of the position at low and speeds close to zero is not possible. To overcome this limitation methods of

sensorless control based on the tracking the position of rotor asymmetries have been proposed. These methods measure the response of the machine to the high-frequency component of the excitation signal. One of the most attractive aspects of this method is the absence of limitations when operating at very low or close to zero speeds, which allows you to control the position of the rotor. The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the method for determining the inductances L_d and L_q in Synchronous Reluctance Machine (SynRM) using the injection of a high-frequency component into the stator voltage. The paper discusses the principles of this method and its application to the mathematical model of the SynRM and the engine M3AL 90LDA 4 by ABB company. Determination of these parameters is necessary for the implementation of sensorless motor control systems.

Key words: synchronous reluctance machine, sensorless control, modeling in MatLab, definition of inductances, high frequency signal processing.

Электротехника, 06-2017, стр. 31-34

Выбор способа нагрева силовых полупроводниковых приборов при их испытании в состоянии высокой проводимости

КАПИТОНОВ С.С., БЕСПАЛОВ Н.Н., ИЛЬИН М.В., ГУЛЯЕВ И.В.

Рассмотрены возможные способы нагрева силовых полупроводниковых приборов при их испытании в состоянии высокой проводимости. Показано, что существенное влияние на процесс измерения параметров приборов оказывает диффузионная ёмкость $p-n$ перехода. Исследовано воздействия диффузионной ёмкости на результат испытания силовых полупроводниковых приборов при различных формах импульсного греющего тока.

Сделаны выводы о возможности применения импульсов тока разнообразной формы для испытания силовых полупроводниковых приборов в состоянии высокой проводимости.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, диоды, тиристоры, силовой преобразователь, состояние высокой проводимости, форма испытательного импульса, диффузионная ёмкость.

The paper considers possible options for heating methods of power semiconductor devices when tested in high conductivity state. It is shown that the diffusion capacitance of the $p-n$ junction has a significant effect on the process of measuring the values of the devices parameters.

Investigation of the effect of diffusion capacitance on the result of testing power semiconductor

devices was carried out under various forms of pulsed heating current. Conclusions are made about the possibility of using current pulses of various shapes for testing power semiconductor devices in high conductivity state.

Key words: power semiconductor devices, diodes, thyristors, power converter, high conductivity state, test pulse shape, diffusion capacitance.

Электротехника, 06-2017, стр. 36-42

Водородные источники электроэнергии с инверторами тока в судовых электростанциях переменного тока

БАЙКО А.В., НИКИТИН В.В., СЕРЕДА Е.Г.

При создании судовых энергосистем перспективным является использование водородных источников энергии, которые по сравнению с традиционными источниками энергии (дизель- или турбогенераторами) обладают рядом весьма существенных преимуществ, например, возможностью обеспечения малошумных режимов движения судна и создания воздухонезависимой корабельной энергоустановки. Применение водородных источников энергии в составе энергосистем с традиционными источниками энергии позволяет оптимизировать работу дизель-генераторов по критерию минимального расхода топлива и обеспечить резерв мощности. В статье анализируются структурные варианты энергетических каналов с водородными источниками электроэнергии и инверторами тока обеспечивающие параллельную работу с дизель- или турбогенераторами в составе судовых электростанций переменного тока. Рассматриваются вопросы регулирования и распределения активных и реактивных мощностей между источниками, работающими на общую нагрузку. Приводится сравнительный анализ обобщенных энергетических показателей и степени искажающего влияния энергетических каналов с водородными источниками энергии на форму напряжения судовой сети в статических режимах работы.

Ключевые слова: судовая электростанция, автономная электроэнергетическая система, водородный источник энергии, синхронный генератор, инвертор тока.

At creation of a ship's electric power systems it is promising to use hydrogen energy sources that if compared to conventional energy sources (diesel or turbine generators) have a number of significant advantages, such as the ability to provide low-noise modes of ship moving and possibility to create air independent naval power systems. Application of hydrogen energy

sources as a part of electric power systems with conventional energy sources allows to optimize operation of diesel generators on criterion of the minimum fuel consumption and to provide a power reserve. The article analyzes the structural variants of energy channels with hydrogen energy sources and current inverters that provide parallel operation with diesel generators (or turbine generators) in a ship's AC electric power system. The problems of active and reactive power regulation and distribution between sources working on a shared load are considered. The comparative analysis of the generalized energy indicators and the degree of the distorting influence of the energy channels with hydrogen energy sources on voltage form in marine power system in static operating modes is provided.

Key words: ship power system, autonomous power system, hydrogen energy source, synchronous generator, current source inverter.

Электротехника, 06-2017, стр. 43-47

Применение электронно-лучевой технологии для изготовления биметаллических контактов электротехнических установок

ДРАГУНОВ В.К., ГОНЧАРОВ А.Л., ПОРТНОВ М.А., ЧУЛКОВ И.С.

Рассмотрен процесс получения соединений из вольфрамово-медного сплава ВМ-80 с хромоциркониевой бронзой БрХ1Цр методами электронно-лучевой пайки, наплавки и сварки применительно к созданию заготовок для изготовления биметаллических электрических контактов. Рассмотрены конструкция биметаллического контакта, основные этапы процессов электронно-лучевой пайки, наплавки и сварки указанных материалов, проведены исследования микроструктуры и механических свойств соединений, полученных методами электронно-лучевой пайки и наплавки, даны практические рекомендации для проведения последующей термической обработки с целью улучшения механических свойств полученных соединений. Результаты работы могут быть интересны специалистам в области проектирования электротехнического оборудования.

Ключевые слова: биметаллический электрический контакт, электронно-лучевая пайка, электронно-лучевая наплавка, электронно-лучевая сварка, микроструктура, механические свойства.

The process of producing compounds of tungsten-copper alloy ВМ-80 and bronze БрХ1Цр, methods, electron beam brazing, surfacing and welding is considered, as applied to the

establishment of billets for further fabrication of bimetallic electrical contacts. The article describes the design of the bimetallic contact, the main stages of the processes of electron-beam brazing, surfacing and welding the above materials, studies of the microstructure and mechanical properties of the compounds obtained by the methods of electron-beam brazing and welding, as well as practical recommendations for follow-up heat treatment to improve mechanical properties of the obtained compounds. The results can be interest to specialists in the field of electrical engineering.

Keywords: bimetal electrical contact, electron beam brazing, electron beam surfacing, electron beam welding, microstructure, mechanical properties.

Электротехника, 06-2017, стр. 48-54

Бездатчиковое управление линейной вентильно-индукторной электрической машиной возвратно-поступательного действия

КОЛПАХЧЬЯН П.Г., ЩЕРБАКОВ В.Г., КОЧИН А.Е., ШАЙХИЕВ А.Р.

Для разработки линейной электрической машины возвратно-поступательного действия, предназначенной для использования в качестве электрогенератора совместно со свободно-поршневым двигателем внутреннего сгорания предложено использовать электрическую машину вентильно-индукторного типа, простую по конструкции, не имеющую обмоток или постоянных магнитов на подвижном элемента. Указано, что одной из наиболее сложных задач при создании такой линейной электрической машины является разработка системы управления. Рассмотрен бездатчиковый алгоритм управления. Для определения положения подвижного элемента используется информация об индуктивности фазы статора электрической машины и ее изменение. Для ее оценки к фазе прикладываются зондирующие импульсы напряжения с известной длительностью, амплитуда вызываемых ими импульсов тока будет пропорциональна индуктивности фазы. Для проверки работоспособности предложенного алгоритма управления, а также определения рациональных параметров регулирования, использовалась математическая модель электромагнитных процессов. Поскольку фазы статора имеют отдельные магнитопроводы и не связаны в магнитном отношении, электромагнитные процессы в каждой фазе рассматриваются независимо. Параметры модели определялись опытным путем, на экспериментальном образце рассматриваемой электрической машины, для чего были получены зависимости потокосцепления фазы и развиваемого усилия от тока фазы при различных положениях подвижного элемента. Приведены результаты исследований

процессов в рассматриваемой электрической машине при различных частотах перемещения подвижного элемента. Установлено, что при частотах перемещения подвижного элемента близких к номинальной, фаза должна подключаться к источнику питания еще до прохода подвижным элементом крайнего положения. Управление с использованием зондирующих импульсов, подаваемых в работающую фазу, невозможно, так как уровень этих импульсов не достигает максимального значения до момента включения фазы. В этом случае для определения положения подвижного элемента необходимо использовать зондирующие импульсы другой, неработающей, фазы. Такой алгоритм позволяет управлять линейной вентильно-индукторной электрической машины возвратно-поступательного действия как при низких, так и при высоких частотах перемещения подвижного элемента. Полученные результаты подтвердили правильность принятых подходов к созданию бездатчикового алгоритма управления.

Ключевые слова: линейная электрическая машина, вентильно-индукторная электрическая машина, математическая модель, бездатчиковое управление.

The article discusses the development of a linear reciprocating electrical machine intended for use as an electric generator in conjunction with a free-piston internal combustion engine. For this proposed to use a switch-reluctance electrical machine, a simple structure having no windings or permanent magnets on the movable element. It is indicated that one of the most difficult tasks when creating a linear electric machine is the development of control systems. Considered sensorless control algorithm. To determine the position of the movable element is the information on the value of inductance of the phase stator of the electrical machine and its change. To estimate the phase of applied probing voltage pulses of known duration. The amplitude of the current pulses caused by them is proportional to the phase inductance. To check the performance of the proposed control algorithm, as well as the definition of rational control parameters, used a mathematical model of electromagnetic processes. Since the phase of the stator yokes are separate and not connected magnetically, electromagnetic processes are considered in each phase independently. The model parameters were determined empirically for the manufacture of an experimental sample under consideration electrical machine: the characteristics of the family phase flux linkage and force that the phase current at different positions of the movable element. The results of studies of processes in the considered electrical machine at various frequencies of the movable element. It is found that when the movable element oscillation frequencies close to the nominal phase is to be connected to the power supply before the passage of the movable element end position. Management using probe pulses

supplied to the operating phase can not be, because their value does not reach the maximum value until the switching phase. In this case, to determine the position of the movable element is necessary to use a different probe pulses, idle, phase. Such algorithm allows to control valve-linear reciprocating switch-reluctance electrical machine action both at low and at high frequencies the movable element. The results confirmed the correctness of the approaches to the creation of sensorless control algorithm.

Key words: linear electrical machine, switch-reluctance electrical machine, mathematics model, sensorless control

Электротехника, 06-2017, стр. 55-60

Исследование параллельной работы трёхфазных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации

РОМОДИН А.В., КУЗНЕЦОВ М.И.

Представлены результаты исследования параллельной работы двух силовых трёхфазных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации. В практике эксплуатации электроэнергетических систем часто возникает задача дробления установленной на подстанциях трансформаторной мощности, которая, как правило, предполагает установку вместо одного двух и более параллельно соединённых трансформаторов, имеющих ту же суммарную мощность. При такой замене возникает проблема равномерного распределения нагрузки между трансформаторами. При использовании одинаковых по мощности и конструктивно подобных трансформаторов равномерность распределения достигается автоматически в силу симметрии параллельных цепей. Однако, если параллельно включаются трансформаторы с разным конструктивным исполнением и имеющие различные коэффициенты трансформации, то равномерность распределения мощности между трансформаторами нарушается. Экспериментально доказано, что параллельная работа трансформаторов со значительной разницей в коэффициентах трансформации при увеличении общей нагрузки приводит к снижению потребляемого тока обмотками трансформатора с большим коэффициентом трансформации.

Ключевые слова: трёхфазный трансформатор, коэффициент трансформации, электрическая нагрузка, распределение мощности, фазовый сдвиг напряжения.

In article results of research of parallel work of two power three-phase transformers with various transformation ratios are presented. In practice of operation of electropower systems often there is a problem of crushing of the transformer capacity established on substations which, as a rule, assumes installation instead of one two and more in parallel the connected transformer, having the same total capacity. At such replacement there is a problem of a uniform distribution of loading between transformers. In case of use identical on capacity and structurally similar transformers uniformity of distribution is reached automatically owing to symmetry of shunt circuits. However, if transformers with a different design and having various transformation ratios automatic uniformity of a power division between transformers changes in parallel join. By authors it is experimentally proved that parallel work of transformers with a considerable difference in transformation ratios at increase in the general loading leads to decrease in a consumed current by windings of the transformer with the big transformation ratio.

Key words: the three-phase transformer, transformation ratio, electric loading, power division, phase shift of voltage.

Электротехника, 06-2017, стр. 61-66

Резонансные явления при перемагничивании цилиндрических образцов в неоднородном переменном поле

САНДОВСКИЙ В.А.

Физика магнитной проницаемости изложена во многих учебниках и монографиях. Все они в основном касаются исследований взаимодействия постоянных магнитных полей с ферромагнитными материалами. Однако на практике взаимодействие переменных полей с ферромагнитными материалами встречается не менее часто. Статья посвящена изучению свойств магнитных материалов в переменных полях. Исследовались цилиндрические образцы диаметром 8 и длиной 160 мм из различных, наиболее распространенных марок сталей. При исследовании намагничивания образцов цилиндрической формы в однородном поле образец намагничивается одновременно по всей длине, что исключает возможность изучения инерционных свойств магнитных материалов или магнитную вязкость. Поэтому была использована схема, предполагающая намагничивание образца в одном месте, а измерение магнитной проницаемости - в другом. В этом случае возникает необходимость измерений в неоднородном поле, при этом намагничивающий сигнал не действует непосредственно на измерительную катушку, а передается посредством прохождения некоторого пути вдоль исследуемого образца, сохраняя при этом

необходимую информацию о материале. Для расчетов используется модель, в которой намагничивающие и измерительные катушки заменены витками. Решение прямой задачи предполагает, что задан сигнал намагничивающего витка, а найти требуется сигнал измерительного витка. Обратная задача заключается в определении составляющих магнитной проницаемости при известном сигнале измерительной катушки, который измеряется экспериментально. В результате решения обратной задачи определяются составляющие комплексной магнитной проницаемости. Приводится схема экспериментальной установки, позволяющей с использованием соответствующей компьютерной программы измерять комплексную магнитную проницаемость на выбранной частоте. Приведена зависимость составляющих магнитной проницаемости от частоты намагничивающего поля. Показано, что частотная зависимость магнитной проницаемости существенно изменяется с изменением химического состава материала образцов (марки сталей).

Ключевые слова: резонанс, магнитное поле, электропроводимость, вихревые токи, поверхностный эффект, доменная стенка, доменная структура, магнитная проницаемость.

Physics of magnetic permeability presented in many tutorial-books and monographs. Whole of them most of all present investigations in interaction between of constant magnetic fields and ferromagnetic materials. But in the practices interaction between alternated fields and ferromagnetic materials take place even more often. The paper deal with studies of the properties of magnetic materials in alternated fields. Cylindrical specimens having diameter 8 and length 160 mm made of different steel grade are used. Measurements of the specimens in homogeneous field should be done. At that the specimen magnetized simultaneously along whole length. At that we should loosed an opportunity to investigate inertial properties of magnetic materials (magnetic viscosity). Therefore we had to accepted more complicate schema. Magnetized and measuring coils situated separate: magnetizing in some place along specimen and measuring one in another. At that necessity rise that demanded to fulfil measurement of the specimens in nonhomogeneous field. But still it take magnetizing signal some time in order to achive measuring coil and a possibility arise to take that into account. With that the valuable information about the material is remained. If the signal of magnetized coil is known and it is necessary to determine the signal of measuring coil the problem consider as direct one. Otherwise, if the signal of measuring coil is known (by means , of measurement) and it is necessary to determine the components of complex magnetic permeability the problem consider as a reverse one. Mathematical model presented in which both coils change into circlets for correspondent calculations. Electric schema of experimental gear makes it possible to define the

both components of complex magnetic permeability with any chosen frequency. For the purpose it had to be used correspondent computer program. The results is shown upon graphics there is dependence of components of permeability from frequency. The curves distinguish one from another quite essentially. That is mean a proof that there is connection between of dependence of permeability from frequency and chemical compositions of specimens (steel grade).

Key words: resonance, magnetic field, conductivity, eddy currents, surface effect, domain wall, domain structure, permeability.

Электротехника, 06-2017, стр. 67-69

О применимости модели дуги Майра для исследования среза тока и перенапряжений, генерируемых маломасляными выключателями
ШПИГАНОВИЧ А.Н., ШПИГАНОВИЧ А.А., ПУШНИЦА К.А.

В настоящее время в эксплуатации находится значительное количество маломасляных выключателей. Они считаются морально устаревшими и уступают по своим характеристикам более современным выключателям – вакуумным и элегазовым. При срабатывании маломасляные выключатели могут быть источником существенных перенапряжений, одной из причин которых является срез тока, связанный с механизмом гашения дуги в плотной среде. Срез тока обычно возникает при отключении малых индуктивных токов, например, тока холостого хода трансформаторов и электродвигателей. При исследовании дуговых процессов в выключателях используются различные методы, в том числе адаптивные (метод «черного ящика»). В статье рассматривается возможность применения модели дуги на основе уравнения Майра для изучения среза тока и перенапряжений, генерируемых маломасляным выключателем. Анализируются особенности построения такой модели, приводится её структура, внешний вид и описание. Построение модели осуществлялось в программном пакете MATLAB. Рассматривался случай отключения RLC-цепи от источника ЭДС с малым сопротивлением с учетом механизма гашения дуги. Цепь моделировала отключение электродвигателя, присоединенного кабельной линией. В статье также проведено сравнение экспериментальных и расчётных данных.

Ключевые слова: маломасляный выключатель, срез тока, перенапряжения, моделирование, имитационная модель, уравнение Майра.

Currently in operation is a significant number of low-oil circuit breakers. They are considered morally obsolete and inferior in their characteristics to more modern types of circuit breakers - vacuum and gas-insulated. When triggered, low-oil circuit breakers can be a source of essential overvoltage, one of the reasons which is the current chopping connected with the mechanism of arc extinction in dense environment. The current chopping usually occurs when small inductive currents are disconnected, for example, the no-load current of transformers and electric motors. At a research of arc processes in circuit breakers various methods are used, including adaptive ("the black box" method). This paper considers the possibility of using arc model based on the Mayr equation to the study of phenomena current chopping and overvoltage, generated by low-oil circuit breaker. Analyzed the features of building such model, given its structure, appearance and description. Model building was carried out in the MATLAB software package. The case of disconnection a RLC circuit from a source of low-resistance EMF was considered, taking into account the mechanism of arc extinction. This circuit simulated the switching off an electric motor connected by a cable line. The article also presents the comparison of experimental and calculated data.

Key words: low-oil circuit breaker, current chopping, overvoltages, modeling, simulation model, Mayr equation.

Электротехника, 06-2017, стр. 70-76

Энергетически эффективные режимы работы преобразователя частоты с последовательно-параллельным резонансным контуром при стабилизации мощности на переменной нагрузке

ОСИПОВ А.В.

Выполнен анализ энергетических характеристик преобразователя частоты при его согласовании с изменяющейся нагрузкой при помощи последовательно-параллельного резонансного контура. Показано, что изменение активной составляющей нагрузки не всегда приводит к пропорциональному изменению входного сопротивления резонансного контура, причем на определенных частотах резонансный контур имеет фактически постоянное входное сопротивление при изменении нагрузки в существенных пределах, то есть обладает свойствами параметрической стабилизации выходной мощности. На этих частотах во входном сопротивлении контура присутствует большая реактивная составляющая, которая не позволяет получить близкий к резонансному режим работы и достичь приемлемой энергетической эффективности преобразования. Проведены исследования частотных характеристик контура при предельном сближении его

резонансных частот, установлено, что в этом случае за счет искажений фазо-частотной характеристики удастся получить квазирезонансный режим работы преобразователя во всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки. Показано, что предложенный способ настройки резонансного контура позволяет при двухкратном изменении нагрузки достичь параметрической стабилизации выходной мощности с энергетическими показателями $\cos\varphi > 0,94$ в крайних точках диапазона изменения сопротивления. Полученные результаты подтверждены имитационным моделированием и физическим экспериментом.

Ключевые слова: последовательно-параллельный резонансный контур, энергетическая эффективность, стабилизация мощности, частотные характеристики.

In the article the analysis of energy characteristics of the frequency converter in case of its coordination with the changing loading by means of a serial-to-parallel resonant circuit is carried out. It is shown that change of the resistive component of the load not always leads to proportional change of input resistance of the resonant circuit, and at certain frequencies the resonant circuit has actually constant input resistance in case when the load varies in essential limits that it possesses properties of parametric output power stabilization. However at these frequencies at input resistance of a circuit there is a large reactive component which doesn't allow to receive the operation mode which will be the close to a resonant operation mode and to achieve the acceptable energy conversion efficiency. In this present researches the frequency characteristics of a circuit in case of critical approach of its resonance frequencies are conducted and also it is set that in this case due to distortions of the phase-frequency characteristic it is possible to receive a quasi-resonant mode of operation of the converter in all range of change of load resistance. Results of calculations showed that the proposed method of adjusting of a resonant circuit allows in case of double change of loading to achieve parametric stabilizing of output power with energy datum of $\cos\varphi > 0,94$ in extreme points of the range of variation of resistance. The received results are confirmed with simulation modeling and physical experiment.

Key words: serial-parallel resonant circuit, the energy efficiency, power stabilization, the frequency characteristics.

Электротехника, 06-2017, стр. 77-81

Параллельная работа трехфазных силовых трансформаторов с различными

напряжениями короткого замыкания

КУЗНЕЦОВ М.И., ДАДЕНКОВ Д.А., ДУДАРЕВ Д.С.

Выполнены исследования параллельной работы трехфазных силовых трансформаторов с различными напряжениями короткого замыкания на лабораторном стенде. Приведена принципиальная электрическая схема экспериментального стенда и векторные диаграммы токов первичных и вторичных обмоток трансформаторов, построенные по экспериментальным данным. Установлено, что при разности напряжений короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов более чем на 10%, возникает не только арифметическая разность токов, но и создается большой фазовый сдвиг вторичных фазных напряжений, в результате чего один из трансформаторов будет перегружен, а другой недогружен. Подтверждено, что ток нагрузки определяется геометрической суммой токов вторичных обмоток трансформаторов. Показано, что один из исследуемых трансформаторов работает в «обращенном» режиме и его токи сдвинуты по фазе на 180° , что является основной причиной нарушения нормального режима работы параллельно работающих трансформаторов.

Ключевые слова: силовой трехфазный трансформатор, параллельная работа трансформаторов, напряжение короткого замыкания, векторная диаграмма токов, эксперимент.

Original research results of three-phase power transformers with different voltages short-circuit parallel operation on the lab bench are considered. It has been established that when the voltage difference between the short-circuit parallel transformers more than 10%, there is not only the arithmetic difference between the currents, but also created a large phase shift of the secondary phase voltages. As a result, the transformers becomes overloaded and the other underloaded. During the tests found that the load current is determined by the geometric sum of the currents of the secondary windings of transformers, transformers and one of the works in the "conversion" mode and its current phase shifted by 180° , which is the main cause of disruption of the normal operating mode of parallel transformers.

Key words: three-phase power transformer, parallel operation of transformers, short-circuit voltage, vector diagram of currents, experimental studies.

Электротехника, 06-2017, стр. 82-83

Яков Борисович Тубис

(к 85-летию со дня рождения)

Электротехника, 06-2017, стр. 84-84

Юрий Моисеевич Иньков

(К 80-летию со дня рождения)