

Электротехника, 2015, №2, стр. 2-4

Исследование дискового униполярного электрогенератора

ЗАХАРЕНКО А.Б., НАДКИН А.К.

Данная работа посвящена исследованию униполярных электрических машин. Актуальность работы обусловлена тем, что развитие ряда отраслей промышленности и техники за последние годы потребовало создания установок на постоянный ток, измеряемый сотнями килоампер. В большинстве случаев подобные установки являются низковольтными. В этих условиях для электрических униполярных машин открылись широкие перспективы практического использования, так как именно указанный тип источника позволяет сравнительно простыми и экономичными средствами генерировать без пульсаций постоянный ток большой величины. В связи с этим к униполярным электрогенераторам проявляется повышенный интерес исследователей. Для дискового униполярного электрогенератора созданы расчетные модели, позволяющие обоснованно выбрать число токоъемов и провести расчет характеристик электрогенератора. Проведено сравнение результатов расчетов и натурального эксперимента, подтвердившее адекватность модели. Результаты и выводы, полученные в ходе проведения исследований, могут использоваться при проектировании и оптимизации униполярных электрических машин.

Ключевые слова: униполярная электрическая машина, парадокс Фарадея, расчетная модель.

This work is devoted to research of unipolar electric machines. Actuality of the work is determined because of development of variety of industries and technologies for last years demanded creation of dc devices which operate with current measured by hundreds kA . In most cases similar devices are low voltage. In this conditions wide possibilities of practical application were opened for unipolar electric machines as that particular type of source permits to generate direct current of huge value without pulsations with relative simple and economical means. Because of this higher interest of investigators appears to unipolar electric generators. This model is longitudinal section of rotor conducting disk of the unipolar generator. Calculation models for the unipolar disc construction of electric generator were created in FEMM software, which allow to reasonably choose number of current collectors and to calculate characteristics of the generator. The comparison of results of calculations and experiments, which confirmed the adequacy of the model, was carried out. Obtained results and conclusions could be used with designing and optimization of unipolar electric machines.

Key words: unipolar electrical machine, Faraday's paradox, calculation model.

Электротехника, 2015, №2, стр. 5-13

Эффект модуляции параметров магнитного поля в синхронных машинах

БАЛКОВОЙ А.П., ЦАЦЕНКИН В.К.

Рассматриваются закономерности образования электромагнитного момента в синхронных машинах, используемых в качестве вентильных двигателей. На базе анализа идеализированных моделей показано, что в реактивных и индукторных машинах плотность запасенной магнитной энергии модулируется основными гармониками МДС обмоток, что приводит к образованию электромагнитного момента за счет взаимодействия возникающих интерференционных гармоник с зубчатым ротором. В редукторных синхронных машинах и однофазных машинах с униполярным возбуждением используется непосредственная модуляция магнитного потока путем выполнения специализированных обмоток или зубчатого статора. При разработке электропривода рекомендуется обеспечивать возможное на практике приближение к выбранному

идеализированному прототипу синхронной машины.

Ключевые слова: прямой электропривод, синхронная машина, эффект модуляции, электромагнитный момент.

The processes of the forming of the electromagnetic torque in synchronous machines used in AC brushless motors for direct drives are considered. In reluctance and variable reluctance motors, the density of magnetic energy is modulated by main harmonics of the windings of magnetomotive forces. This modulation causes the interaction between interference harmonics and toothed rotor. In variable reluctance motors and single-phase unipolar machines, there is the direct modulation of the magnetic flux by performing the specific windings or toothed stator. By the design of electric drive it is recommended to provide possible near approximation to chosen idealized prototype of the synchronous machine for this drive.

Key words: direct drive, synchronous machine, effect of modulation, electromagnetic torque.

Электротехника, 2015, №2, стр. 13-15

Исследование формы кривой напряжения синхронного генератора

БАЛОВНЕВ Д.И.

Предложен метод для исследования формы кривой напряжения синхронного генератора на основе расчёта электромагнитного поля. В качестве допущения принято, что электромагнитное поле в воздушном зазоре генератора плоскопараллельное и квазистационарное. Математическая модель построена на уравнениях двумерного электромагнитного поля и позволяет учесть реальную геометрию магнитной системы, насыщение и режим работы генератора. Для решения уравнений электромагнитного поля использован метод конечных элементов. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения определяется по сорока высшим гармоникам напряжения фазы. Для компьютерного моделирования использовано несколько программ: Компас-3D V14, Mathcad 15, FEMM-4.2. Исследовано влияние конструкции и нагрузки синхронного генератора на коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного напряжения. Проведена оценка адекватности предложенного метода путём сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: синхронный генератор, качество электрической энергии, электромагнитное поле.

A method is proposed to study the stress curve of a synchronous generator based on the calculation of the electromagnetic field. As assumptions made that the electromagnetic field in the air gap of the generator plane-parallel and quasi-stationary. The mathematical model is based on the two-dimensional equations of the electromagnetic field and allows to take into account the real geometry of the magnetic system, saturation and mode of operation of the generator. To solve the equations of the electromagnetic field used finite element method. The THD voltage curve is determined by forty higher harmonic voltage phase. For computer simulation used several programs: Kompas-3D V14, Mathcad 15, FEMM-4.2. The influence of design and load of the synchronous generator to the distortion factor of the waveform of the phase voltage. An evaluation of the adequacy of the proposed method by comparing the calculated and experimental data.

Key words: synchronous generator, quality of electrical energy, electromagnetic field.

Влияние импульсных линейных электромагнитных двигателей на колебания напряжения в электрической сети промышленного предприятия

МОШКИН В.И. , УГАРОВ Г.Г.

Особенностью линейных электромагнитных двигателей в приводе ударных машин является импульсный характер электропотребления от электрической сети промышленного предприятия, вызывающий недопустимые колебания напряжения. Актуальность исследований вызвана необходимостью определения диапазонов допустимых параметров электрической сети и импульсного линейного электромагнитного двигателя при питании его через трёхфазный мостовой выпрямитель для обеспечения допустимого уровня изменения напряжения электрической сети. Из диаграммы тока при включении электромагнитного двигателя и питании его через трёхфазный мостовой выпрямитель аналитически получено выражение тока фазы, которое разложено в ряд Фурье на первом периоде промышленной частоты с учетом только основной гармоники. Из выражений первой гармоники тока и бросков реактивной и активной мощностей, потребляемых от сети на первом периоде, получены соотношения параметров питающей сети и электромагнитного двигателя. Установлены области допустимых значений этих параметров, удовлетворяющих уровню изменения напряжения электрической сети, равному 5%. Вне областей допустимых изменений напряжения необходимо использовать либо промежуточный накопитель энергии, либо конструкцию электромагнитного двигателя, снабженную устройством удержания якоря. На примере расчёта пяти типоразмеров трёхфазных масляных трансформаторов определены границы и области допустимого изменения параметров импульсных электромагнитных двигателей при питании их от трёхфазной системы электроснабжения через мостовой выпрямитель.

Ключевые слова: линейный электромагнитный двигатель, колебания напряжения, бросок реактивной мощности, область допустимых изменений параметров.

Feature of linear electromagnetic engines in the drive of shock mechanisms is pulse character of a power consumption from an electric network of the industrial enterprise, causing inadmissible fluctuations of tension. Relevance of researches is caused by need of determination of ranges of admissible parameters of an electric network and the linear electromagnetic engine at power supply it via the three-phase bridge rectifier for providing admissible level of change of tension of an electric network. From the schedule of electric current at turning on of the electromagnetic engine and its power supply via the three-phase bridge rectifier expression of current of a phase which is spread out in a row by Fourier on the first period of industrial frequency taking into account only the first harmonica is analytically received. From expressions of the first harmonica of current, throws of the jet and active capacities consumed from a network on the first period, ratios of parameters of a power line and the electromagnetic engine are received. Areas of admissible values of these parameters, satisfying are established to level of change of tension of the electric network, equal 5%. Out of areas of electric network, equal 5%. Out of areas of admissible changes of tension it is necessary to use or the intermediate store of energy, or the design of the electromagnetic engine supplied with the device of deduction of an anchor. On the example of calculation of five dimensions of three-phase oil transformers borders and areas of admissible change of parameters of pulse electromagnetic engines are defined at their food from three-phase system of power supply via the bridge rectifier.

Key words: linear electromagnetic motor, voltage fluctuation, cast of reactive power, range of permissible parameter changes.

Модификации аварийных составляющих наблюдаемых токов и напряжений

ЛЯМЕЦ Ю.Я., БЕЛЯНИН А.А., ВОРОНОВ П.И.

Дано развитие представлений об аварийных составляющих электрических величин и соответствующем чисто аварийном процессе. Показана специфика аварийных составляющих токов и напряжений, наблюдаемых в различных местах контролируемого объекта. Каждая аварийная составляющая может быть разделена на два компонента. Существует несколько вариантов разделения, поскольку первые компоненты создаются половиной наблюдаемых величин: из каждого отдельно взятого места наблюдения, где регистрируются ток и напряжение, отбирается что-либо одно. В соответствии с принципом компенсации отобранные величины вводятся в виде известных источников напряжения или тока в пассивную модель неповреждённого объекта. Первые компоненты определяются как реакции на действие этих источников. Вторые компоненты создаются неизвестными источниками чисто аварийного процесса, действующими в неизвестном месте повреждения объекта. Соответствующая активная модель повреждённого объекта замкнута или разомкнута в местах наблюдения. Замкнута там, где ранее действовал источник напряжения, и разомкнута там, где был источник тока. Теория аварийных составляющих применена к решению задачи определения места повреждения фидера, наблюдаемого с обеих сторон. Целевой функцией служит среднеквадратическое отклонение вторых компонентов аварийных составляющих двух напряжений, определяемых в произвольном месте фидера по результатам его наблюдения с разных сторон. Участки фидера, левый и правый относительно места предполагаемого повреждения, описываются разностными уравнениями длинной линии. Отсчёты второго компонента каждого из двух напряжений в месте предполагаемого повреждения выражаются через запаздывающие и опережающие отсчёты второго компонента тока в соответствующем месте наблюдения. Разностные уравнения линии учитывают потери в виде сосредоточенных сопротивлений. В рассмотренном примере достаточную точность обеспечивают два сопротивления на концах каждого участка фидера.

Ключевые слова: модель энергообъекта, наблюдение электрических величин, определение места повреждения, аварийные составляющие.

The development is given of ideas about the fault components of electrical quantities and about the corresponding pure fault process. The specificity is shown of fault components of currents and voltages supervised in the different places of the controlled object. Each fault component can be separated into two parts. There are several variants of separation, because the first components are created by a half of observed values: from every point of observation of current and voltage is selected one. In accordance with the principle of compensation selected values are introduced as known sources of voltage or current to the passive undamaged object's model. The first components are defined as the reaction to the action of these sources. The second components are created by unknown sources of pure fault process, which operates in unknown object's fault location. Corresponding active model of damaged object is opened or closed in places of observation. It's short-circuited where voltage source previously acted and open-wired where a current source was. Fault components theory is applied to solution of problem of feeder fault location at both sides observed. The objective function is the standard deviation of the second component of fault components of the two voltages, which defined in arbitrary position of the feeder as a result of its observations at different sides. Feeder sections, left and right relative to the estimated fault location are described by long line difference equations. Samples of the second component of each of the two voltages in the estimated fault point are calculated via lagging and leading samples of the second component of the current in the corresponding place of observation. Difference line's equations consider losses as lumped resistances. In considered example the required

accuracy is provided by two resistances at the ends of each feeder section.

Key words:, power facility model, monitoring of electrical quantities, fault locating, fault components.

Электротехника, 2015, №2, стр. 28-34

Система управления силовыми токами компенсации мгновенной неэффективной мощности
НОС О.В., ХАРИТОНОВ С.А.

Прикладная задача повышения энергоэффективности трехфазных систем переменного тока, заключающаяся в снижении или полном исключении потерь от действия неактивных потоков электрической энергии, может быть достигнута за счет практического использования активных силовых фильтров, которые позволяют устранить искажения в гармонической форме сигналов, подавить высокочастотные гармоники, выполнить симметрирование фазных переменных, уменьшить скачки напряжения, демпфировать резонансные явления и т.д. В статье излагаются основные положения нового подхода к формированию компенсационных воздействий на выходе данного типа полупроводниковых преобразовательных устройств, который основывается на разделении фазных токов произвольного вида на активную и реактивную составляющие с использованием гиперкомплексного пространства. Результаты экспериментальных исследований показывают, что разработанные алгоритмы компенсации обеспечивают единичный или опережающий коэффициент мощности при гармонической форме потребляемых токов в случае явно выраженной асимметрии и нелинейности цепей нагрузки, что позволяет на практике реализовывать высокоэффективные энергосберегающие трехфазные системы передачи, распределения и преобразования электрической энергии.

Ключевые слова: активный силовой фильтр, гиперкомплексное пространство, кватернионы активного и реактивного мгновенных токов, алгоритм компенсации.

The power quality improvement of three-phase AC systems can be achieved by reduction or full compensation of the losses caused the inactive electrical energy flows. The conventional approach to power conditioning is implemented with using the active power filters which allow the damping of harmonic and resonance distortions, load balancing, voltage-flicker reduction etc. In this regard the paper presents the basic principles of a new technique to control the compensative reference of these power semiconductor convertors, based on the separation of any three-phase currents into active and reactive components by using hyper-complex space. The experimental testing of control strategy for compensation shows unity or leading power factor with sinusoidal waveform of source currents in the nonlinear unbalanced load. This concept allows to implement the high performance three-phase systems of transmission, distribution and transformation of AC electrical energy.

Key words: active power filter, hyper-complex space, active and reactive components of instantaneous currents quaternion, control strategy of compensation.

Электротехника, 2015, №2, стр. 35-40

Диагностический мониторинг в распределительных сетях
ГЕНИН В.С., КОЗНОВ В.В., ФЕЛЬДМАН С.О.

На объектах электроэнергетики России в настоящее время выявилась стойкая тенденция «старения» парка электрооборудования. Это обуславливает необходимость внедрения достоверных и эффективных диагностических решений. К сожалению, внедрение на

распределительных подстанциях специализированных систем диагностического мониторинга не всегда экономически оправдано. В то же время на таких подстанциях уже достаточно широко внедряются современные терминалы РЗА и АСУ, в связи с чем актуально использовать эти средства для мониторинга основного оборудования. Рассмотрены возможности организации диагностического мониторинга оборудования распределительных подстанций по IEC 60076-7:2005 с использованием средств автоматизированной системы управления (АСУ) и первичных датчиков релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА). Проведен анализ возрастания ошибок в оценках температуры верхних слоев масла (ВСМ) и наиболее нагретой точки обмотки (ННТ) трансформатора по IEC 60076-7:2005 при использовании в качестве первичных датчиков трансформаторов тока и напряжения РЗА. Показано, что: при номинальной нагрузке трансформатора ошибка расчета, например, температуры ВСМ менее 2,5%, однако следует учитывать, что обычно трансформатор эксплуатируется с коэффициентом нагрузки менее 1; абсолютные ошибки в расчетах значений температуры ВСМ и температуры ННТ, вызванные погрешностями в контроле коэффициента нагрузки, не зависят от температуры окружающей среды; рассматриваемые расчетные модели более чувствительны к погрешностям первичных измерений при повышении коэффициента нагрузки тогда, когда возникает угроза перегрева. Обоснована возможность более эффективного использования средств автоматизированной системы управления и релейной защиты для диагностического мониторинга распределительной подстанции.

Ключевые слова: электрооборудование, распределительная подстанция, мониторинг.

During the preset time at the electroenergetics facilities in Russia a consistent trend of “aging” of the fleet of electrical equipment was revealed. This stipulates the necessity of the introduction of reliable and effective diagnostic solutions. Unfortunately, the implementation of the specialized diagnostic monitoring systems at the distributed substations is not always economically justified. At the same time, in these substations modern terminals relay protection and automated control system are already widely adopted, on account of this, it is relevant to use these tools to monitor the main equipment. The opportunities of diagnostics monitoring of equipment of distribution substations by IEC 60076-7:2005 with the use of an automated control system and the terminal of relay protection were considered. The analysis of increasing errors of the estimates of top-oil temperature and hot-spot temperature for transformer IEC 60076-7:2005 when current and voltage are used as a primary sensors of transformers system protection was carried out. Obtained: at a rated load of the transformer the calculation error, for example, for top-oil temperature less than 2.5%, provided that the transformer is usually operated with a load factor of less than 1; the absolute errors in the calculations of top-oil temperature and hot-spot temperature caused by errors in the control of the load factor does not depend on the ambient temperature; considered computational models are more sensitive to the errors of the initial measurements when the load factor becomes higher that is when there is a risk of overheating. The significance of the derived results is that the possibility of more efficient use of the automated control system and relay protection for the diagnostic monitoring of a distributed substation is substantiated.

Key words: electrical equipment, distributive substation, monitoring.

Электротехника, 2015, №2, стр. 41-43

Алгоритмы локации сигналов тока и напряжения при однофазных замыканиях на землю в распределительных воздушных сетях

ХУЗЯШЕВ Р.Г., КУЗЬМИН И.Л., НОВИКОВ С.И., СИДОРОВА С.В.

Воздушные электрические сети среднего класса напряжения (6–35 кВ) являются наименее надежными звеном в поставке электроэнергии потребителям. Наиболее распространенный вид повреждений в таких сетях – однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). Особенностью ОЗЗ в отличие от короткого замыкания в сетях с заземленной нейтралью является малое значение аварийного тока относительно фазного тока нагрузки, что затрудняет его распознавание. С целью повышения надежности определения начала ОЗЗ в статье рассматриваются алгоритмы выделения переходных сигналов тока и напряжения, реализуемых цифровыми фильтрами (ЦФ). Для разработки алгоритмов ЦФ были проанализированы осциллограммы фазных токов и напряжений, зарегистрированные на линиях электропередач во время ОЗЗ с помощью цифрового осциллографа. Построены амплитудно-частотные характеристики ЦФ для различных алгоритмов. Показано, что при определенных параметрах амплитудно-частотная характеристика цифрового фильтра оптимально согласуется со спектром переходного процесса, тем самым повышая надежность обнаружения начала ОЗЗ по критерию «сигнал/шум».

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю; мониторинг режимов; алгоритмы цифровых фильтров; осциллограммы токов и напряжений.

Overhead system medium voltage are the least reliable a link in power transmissions to consumer. The most widespread mode of failure to such system – phase-to-earth fault. Feature of phase-to-earth fault, unlike short circuit on earthed neutral system, small value of fault current of rather phase current of loading that complicates its recognition is. In article algorithms of separation of the current and voltage transient by means of digital filters are considered. For algorithm elaboration of digital filters the oscillograms of phase currents and voltage registered on power lines during phase-to-earth fault by means of a digital oscillograph were analyzed. Amplitude-frequency characteristic of digital filters for different algorithms are constructed. It is shown that at particular parameters the amplitude-frequency characteristic of the digital filter will optimum be coordinated with the transient phenomenon spectrum, that most increasing reliability of detection beginning phase-to-earth fault by criterion «signal/noise».

Key words: distribution networks, phase-to-earth fault; current sensor; algorithms of digital filters; current and voltage oscillograms.

Электротехника, 2015, №2, стр. 44-50

Особенности моделирования электромагнитного поля в зоне подключения боковых шинных пакетов к токоподводам печи графитации

ЯРЫМБАШ Д.С., ОЛЕЙНИКОВ А.М.

Статья посвящена разработке методики идентификация электрических параметров и расчета эффективного сечения торцевых шин, токоподводов печи графитации, участков боковых шинных пакетов со стороны заднего торца печи графитации переменного тока и повышению энергоэффективности как печного оборудования, так и электротехнических комплексов графитации в целом для производства ликвидной и конкурентоспособной продукции. Существующие методы расчетов обладают допущениями, которые существенно искажают реальную картину электромагнитных процессов в сложной пространственной системе токоподводов печи графитации и шинных пакетов печной петли и не отвечают современным требованиям по точности. В работе проведено численное моделирование сопряженных пространственных электромагнитных и температурных полей в зоне подключения боковых шинных пакетов к токоподводам печей графитации переменного тока методами конечных

элементов, теории электромагнитных полей, тепломассопереноса. Представлены теоретические исследования и моделирование электромагнитных, электротепловых и тепломассообменных процессов в зоне подключения боковых шинных пакетов к токоподводам печи графитации на основе численной реализации методом конечных элементов обобщенной 3D модели графитации постоянным и переменным током, учитывающей температурные зависимости электрофизических и теплофизических свойств материалов шин и токоподводов. Предложена методика расчета эффективного сечения торцевых шин по критериям равной загруженности, обеспечивающая снижение массы и электрических потерь в торцевых шинах. Определен характер и закономерности распределения плотностей токов и удельных электрических потерь в шинах торцевых шинных пакетов и токоподводах печи графитации. Установлено, что реализация критериев равной загруженности по плотности тока и удельным электрическим потерям при выборе эффективных сечений шин торцевых шинных пакетов позволяет снизить их массу на 12%, активные потери на 15% относительно базового конструктивного исполнения и улучшить показатели энергоэффективности электротехнического комплекса графитации. Предложенная методика может применяться как для печей сопротивления прямого действия, так и для дуговых печей большой мощности, работающих на переменном токе промышленной частоты.

Ключевые слова: печи графитации, токоподвод, электромагнитное поле, моделирование.

Article are devoted the development of electrical parameters identification and calculation method of the effective cross-section of end busbar, of the furnace current leads, of the side busbar packages from the rear end of the AC graphitization furnace, the energy efficiency of both the furnace equipment and electrical system for production of liquid and competitive electrodes is studied. The existing models and calculation methods are significantly assumptive, distort the actual depiction of electromagnetic processes in the complex spatial system of the current leads of graphitization furnace and busbar packages of a furnace loop, do not match the accuracy standards and are in need of reinventory. In this paper are performed the numerical modeling of conjugate three-dimensional electromagnetic and thermal fields in the heat and mass transfer. Theoretical research and modeling of electromagnetic and thermoelectric processes in the area of the side of bus packets to the current leads of the AC graphitization furnaces connection and application of the finite element method of the numerical realization of generalized 3D model of DC and AC graphitization are presented. The method of the effective cross-section of end busbar calculation according to equal load criteria is proposed. The mass reduction of electrodes is thus provided. Features and regularities of current density and specific electrical losses in the end busbar packages and the current leads of the AC graphitization furnaces distribution are defined. The implementation of equal load criteria of current density and specific electrical losses to calculate the effective cross sections of end busbar packages provide for the reduction of weight by 12%, for the reduction of active losses by 15%, as to the default design. The energy efficiency of electrical graphitization complex is achieved. The proposed technique can be used for direct action resistance furnaces and high capacity electric arc furnaces of AC power frequency.

Key words: graphitization furnace, current eads, electromagnetic field, modeling.

Электротехника, 2015, №2, стр. 51-56

Сравнительный анализ статических характеристик биполярных транзисторов с изолированным затвором и тиристоров с полевым управлением

БОНОМОРСКИЙ О.И., КЮРЕГЯН А.С., ГОРБАТЮК А.В., ИВАНОВ Б.В.

Проведено двумерное численное моделирование эквивалентных кремниевых биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ) и тиристоров с электростатическим управлением (СИТ) траншейной конструкции в блокирующем и проводящем состоянии. Толщина d высокоомной n -базы изменялась в пределах 120–456 мкм при концентрациях доноров $N_d = (7-1,75) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и диффузионной длине неравновесных носителей заряда $L = (0,25-1,0)d$. Сравнительный анализ результатов показал, что блокирующие характеристики СИТ и БТИЗ практически совпадают, а напряжение пробоя U_b изменяется в пределах 1,4–4,6 кВ в зависимости от d , N_d и I . Падение напряжения в открытом состоянии у БТИЗ без стоп-слоя заметно больше, чем у СИТ, преимущество которого увеличивается с ростом U_b и с уменьшением L . Причиной этого является относительно низкая эффективность инжекции катодного эмиттера БТИЗ, приводящая к сильному снижению концентрации неравновесных носителей заряда вблизи катода и соответствующему росту напряженности поля. Введение в БТИЗ дополнительного тонкого стоп-слоя n -типа между базой и коллектором существенно ослабляет утечку дырок. Это повышает эффективность инжекции и приводит к существенному росту концентрации электронов и дырок и снижению напряженности поля E в ближайшей к катоду половине базы БТИЗ. В результате падения напряжения на БТИЗ и на СИТ сближаются между собой, причем тем сильнее, чем меньше L и плотность тока и чем больше U_b . Однако и в таком модифицированном БТИЗ концентрация n остается меньше, а напряженность поля E больше, чем в СИТ. Поэтому при плотностях тока $J > 10 \text{ А/см}^2$ СИТ обладает меньшим сопротивлением в открытом состоянии, чем эквивалентный модифицированный БТИЗ.

Ключевые слова: биполярные транзисторы с изолированным затвором, тиристоры с электростатическим управлением, вольт-амперные характеристики, сравнительный анализ.

Two-dimensional numerical simulation of equivalent silicon insulated gate bipolar transistors (IGBT) and static induction thyristors (SITh) with trench structure in the conductive and blocking states has been performed. The thickness d of the high-resistance n -base was changed within 120–456 mm at donors concentrations cm^{-3} and the diffusion length of non-equilibrium charge carriers. A comparative analysis of the results has shown that the blocking characteristics of the SITh and IGBT are almost the same but the breakdown voltage varies in the range of 1.4–4.6 kV depending on , and . The voltage drop in the conductive states in the IGBT without relatively low injection efficiency of the cathode emitter of IGBT leading to a strong decrease of nonequilibrium charge carriers concentration near the cathode, and a corresponding increase of the field strength. Introduction of an additional thin n -type stop-layer between the base and the collector of IGBT leads to a significant weakening of the holes leakage. This improves the efficiency of injection and results in a significant increase of electrons and holes concentrations and reduces field strength in the nearest to the cathode half base of IGBT. As a result, the voltage drop on the IGBT and SITh converge together, especially with decreasing L and current density and with increasing . However, even in such modified IGBTs concentration is less, and the field strength is more than in SIT. Therefore, at the current density $J > 10 \text{ A/cm}^2$ SITh has a lower on-state resistance than the equivalent modified IGBT.

Key words: insulated gate bipolar transistors, static induction thyristors, current-voltage characteristics, comparative analysis.

Электротехника, 2015, №2, стр.5 1-60

Универсальная математическая модель трехфазного трансформатора с единым магнитопроводом

ПУСТОВЕТОВ М.Ю.

Разработана универсальная математическая модель трёхфазного трансформатора с единым магнитопроводом для различных сочетаний соединения первичной и вторичной обмоток по схемам звезда и треугольник, позволяющая описать электромагнитные процессы в трансформаторах с любой из 12 групп соединения обмоток по часовой системе обозначений. Необходимость разработки модели с такими свойствами продиктована требованиями ГОСТ 30830-2002 (МЭК 60076-1-93), а также широким распространением фазосдвигающих трансформаторов в схемах питания силовых полупроводниковых преобразователей. Приведены примеры моделирования токов и напряжений для трехфазного трансформатора со схемой и группой соединений обмоток Y/Y-8 и Y/Y-4. Предлагаемая модель позволяет исследовать режимы работы трёхфазного трансформатора в случаях несимметрии параметров его фаз или нагрузки, а также при несимметричном питании, в том числе от источника не синусоидального напряжения. Индивидуальный по каждой фазе учёт нелинейности кривой намагничивания позволяет корректно моделировать влияние насыщения магнитной цепи трансформатора на гармонический состав токов и напряжений.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, математическая модель, группа соединения, звезда, треугольник.

Uniformed mathematical model of 3-phase transformer with single magnetic core for different variants of primary and secondary windings connections using wye and delta schemes at every of 12 phase shifts using clock notation is described. Necessity of such a model design is caused by requirements of standard GOST 30830-2002 (IEC 60076-1-93) and by wide spread of phase-shifting transformers as elements of schemes of power semiconductors converters feeding. Examples of simulation results for cases of 3-phase transformers of Yy8 and Yy4 schemes and vector groups are shown. Suggested model allows to investigate working modes of 3-phase transformer at unbalanced sets of parameters for it's phases or phases of load and in cases of feeding from source with nonsymmetrical voltage besides, including nonsinusoidal. Per phase taking into account nonlinearity of magnetization curve allows simulate correctly harmonic composition of currents and voltages.

Key words: 3-phase transformer, mathematical model, phase shift using clock notation, wye, delta.

Электротехника, 2015, №2, стр. 61-66

Модель поля электромагнитных сил процесса перемешивания жидкой стали при непрерывном литье заготовок

НЕМЦОВ М.В.

Электромагнитное перемешивание (ЭМП) жидкой стали в кристаллизаторе способствует образованию мелкозернистой структуры слитка при непрерывном литье заготовок и улучшает качество стали. Недоступность внутреннего объема кристаллизатора, заполненного жидкой сталью при температуре 1500 С, делает невозможным натурные исследования процесса перемешивания. Поэтому актуальным становится математическое моделирование как способа анализа процесса ЭМП и научно обоснованного проектирования эффективных устройств ЭМП. В статье рассматривается математическая модель вращающегося магнитного поля на примере двухфазного устройства ЭМП при допущениях, главным из которых является допущение однородности магнитного поля в поперечном сечении полюсов. Это допущение, обусловленное конструкцией полюсов и низкой частотой магнитного поля (до 8 Гц), позволяет заменить однородную плотность объемных связанных токов полюсов однородной плотностью поверхностных связанных токов полюсов и далее заменить действие самих полюсов действием

эквивалентных однослойных катушек. Эквивалентное преобразование позволяет рассчитывать индукцию магнитного поля в объеме кристаллизатора суммированием магнитных индукций витков с током всех катушек в немагнитной среде (относительная магнитная проницаемость жидкой стали). Достоверность моделирования магнитного поля подтверждена экспериментально. Моделирование магнитного поля позволяет далее моделировать поле электромагнитных сил в кристаллизаторе; оценить интенсивность принудительного перемешивания в различных зонах кристаллизатора; научно обосновать проектирование эффективных устройств ЭМП.

Ключевые слова: кристаллизатор, литье, модель, жидкая сталь.

The Electromagnetic Mixing (EM) of liquid steel in a crystallizer enhances the forming of minute grain structure ingot during the continuous casting of billets and improves the quality of the steel. The high temperature of the liquid steel (up to 1500 degrees Celsius) and the inaccessibility of the crystallizer's internal volume make it impossible to conduct natural investigation of the mixing process. Therefore analyzing the process using mathematical modeling of EM and a scientifically based design of the efficient EM tools is an important task. The article reviews the mathematical model of a rotating magnetic field using the example of a two phase EM tool with certain assumptions, the most important being the assumption of the homogeneity of the magnetic field in the cross section to the poles. This assumption is related to the construction of the poles and the low frequency of the magnetic field (up to 8 Hz), allows to change the homogeneous density of the volume connected currents of the poles with the homogeneous density of the superficially connected currents and further change the effect of the poles themselves by that of equivalent single layer coils. An equivalent transformation allows to calculate the induction of the magnetic field in the crystallizer volume by adding the magnetic induction of the loops of all the coils in a non-magnetic environment (the relative magnetic penetrability of liquid steel is). The validity of the modeling of the magnetic field is confirmed experimentally. Modeling the magnetic field makes it possible to model further the electromagnetic forces in the crystallizer and evaluate the intensity of the mixing in various zones of the crystallizer as well as provide a scientific background for the design of the effective EM tools.

Key words: crystallizer, casting, model, liquid steel.