

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ ЧАСТИЦ ПРИ СЕПАРАЦИИ В БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

М.Е. Зязев, Э. В. Гиззатуллин, А.Ю. Коняев

При промышленной переработке твердых для извлечения частиц цветных металлов применяется электродинамическая сепарация в бегущем магнитном поле. В статье рассмотрены электродинамические сепараторы на основе линейных индукторов при подаче отходов по ленте конвейера. В статье показано, что на стадии проектирования сепаратора необходимо рассчитывать траектории движения сепарируемых частиц. Отмечены трудности такого расчета. Представлена математическая модель для исследования электродинамического сепаратора на основе линейного индуктора. Важной частью модели являются уравнения для комбинированного воздействия на частицу электромагнитных и механических сил, величина которых корректируется в ходе расчета. В модели учитывается движение проводящих частиц в двух направлениях: перенос частиц по ленте конвейера и поперечное движение под действием электромагнитных сил. Описаны результаты исследований промышленного образца сепаратора. Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами промышленных испытаний.

Ключевые слова: переработка твердых отходов, электродинамическая сепарация, электромагнитные и механические силы, математическая модель, результаты исследований

MODELING AND RESEARCH INTO MOTION OF CONDUCTING PARTICLES UNDER SEPARATION IN THE TRAVELING MAGNETIC FIELD

M.E. Zyazev, E.V. Gizzatullin, A.Yu. Konyaev

The procedure of electrodynamic separation in the travelling magnetic field is used in industrial processing of solids applied for extraction of particles of non-ferrous metals. The article considers electrodynamic separators based on linear inductors applied when the waste is fed onto the conveyor belt. The article shows the necessity to calculate the trajectories of separated particles at the design stage of such separators. The focus is made on the challenges related to the calculation procedure. The authors present a mathematical model for the study of electrodynamic separators based on linear inductors. An important part of the model are equations related to electromagnetic and mechanical forces producing a combined effect on the particle, with the value corrected in the course of calculations. The model takes into account the movement of conducting particles in two directions: the transfer of particles along the conveyor belt and lateral movement under the influence of electromagnetic forces. The research results of an industrial sample of a separator are described. The calculation results are compatible with the results of industrial tests.

Keywords: solid waste processing, electrodynamic separation, electromagnetic and mechanical forces, mathematical model, research results

УТОЧНЕННЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СЕПАРАТОРОВ НЕМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов, С.А. Нестеров

Магнитожидкостная сепарация является перспективным способом разделения смесей немагнитных материалов на фракции по плотности с возможностью электромагнитной регулировки границ сепарации. Точность разделения материалов в электромагнитных магнитожидкостных сепараторах определяется применяемой конструкцией и режимом работы. Электромагнитные процессы в таких сепараторах недостаточно исследованы, особенно при разделении частиц малых размеров, многокомпонентных и многофракционных смесей частиц разнородных материалов. Не в полной мере рассмотрены вопросы влияния формы немагнитных частиц, степени заполнения рабочего зазора сепаратора частицами. В связи с этим является актуальным уточненный

электромагнитный анализ электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов с учетом распределения магнитного поля и влияния гидродинамических свойств магнитной жидкости на движение частиц в зоне разделения. Для достижения цели используются численные методы анализа электромагнитных процессов в магнитожидкостных сепараторах. Полученные результаты позволяют разрабатывать усовершенствованные конструкции электромагнитных сепараторов с повышенной точностью сепарации.

Ключевые слова: сепарация немагнитных материалов, магнитная жидкость, электромагнитный магнитожидкостный сепаратор, уточненный электромагнитный анализ
UPDATED ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF SEPARATORS WITH MAGNETIC FLUIDS FOR NON-MAGNETIC MATERIALS

Yu.B. Kazakov, Yu.I. Stradomsky, V.A. Filippov, S.A. Nesterov

Magnetic fluids separation is a promising method for separating mixtures of nonmagnetic materials into density fractions with a possibility for electromagnetic separation control. The accuracy of material separation in electromagnetic magnetic fluid separators is determined by their design and operating mode. Electromagnetic processes in such separators have not been sufficiently studied, especially when separating small particles, multicomponent and multifractional mixtures of particles of dissimilar materials. The issues relating the influence of the shape of nonmagnetic particles, the degree of filling the working gap of the separator with particles are not fully considered. In this regard, an updated electromagnetic analysis of electromagnetic magnetic fluid separators of nonmagnetic materials, taking into account the distribution of the magnetic field and the influence of hydrodynamic properties of the magnetic fluid on the movement of particles in the separation zone is urgent. To achieve this goal, numerical methods for analyzing electromagnetic processes in magnetic fluids separators are used. The results obtained make it possible to develop improved designs of electromagnetic separators with enhanced separation accuracy.

Keywords: separation of non-magnetic materials, magnetic fluid, electromagnetic magnetic fluid separator, updated electromagnetic analysis

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОКА ИНДУКТОРА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Е.О. Осипова, О.А. Маркелова, В.А. Кошуро, А.А. Фомин

В статье рассматривается процесс индукционно-термической модификации титановых покрытий, сформированных на титановых образцах методом электроплазменного напыления. Экспериментально установлено влияние тока индуктора в диапазоне от 3,5 до 8,0 кА на температуру обрабатываемых образцов. Результаты исследований показали, что при термической модификации в воздушной среде происходило изменение структуры и механических свойств титановых покрытий. Установлено, что с увеличением температуры нагрева увеличилась пористость с 56 ± 2 до 61 ± 1 %, толщина слоя снизилась с 320 ± 30 до 114 ± 15 мкм. За счет изменения структуры материала покрытия при окислении увеличилась микротвердость с 1035-1532 до 1825-1883 HV_{0,98} в зависимости от тока индуктора и температуры обработки. Микротвердость подложки также увеличивается с изменением температуры обработки со 145 до 442 HV_{0,98}.

Ключевые слова: индукционно-термическая обработка, электроплазменное напыление, титан, микротвердость, покрытие

EFFECTS OF INDUCTOR CURRENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMAL SPRAY COATINGS ON TITANIUM

E.O. Osipova, O.A. Markelova, V.A. Koshuro, A.A. Fomin

The article considers the induction heating modification technique of titanium coatings formed on titanium samples using electropasma spraying methodology. The influence of inductor current in the range 3.5 to 8.0 kA on the temperature of the processed samples has been established experimentally. The research results showed that the structure and mechanical

properties of titanium coatings change under thermal modification in the aerial environment. It was found that with an increase in the heating temperature, the porosity increased from 56 ± 2 to 61 ± 1 %, whereas the layer thickness decreased from 320 ± 30 to 114 ± 15 μm . Due to the change in the structure of the coating material during oxidation, the microhardness increased from 1035-1532 to 1825-1883 HV0.98, depending on the inductor current and processing temperature. The microhardness of the substrate also increases with a change in the processing temperature from 145 to 442 HV0.98.

Keywords: induction thermal treatment, electroplasma spraying, titanium, microhardness, coating

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Л.Р. Гайнуллина, А.Р. Фасыхов

Изучено влияние механических примесей на электрическую прочность трансформаторного масла ГК. Проведены замеры пробивного напряжения масла ГК и модельных смесей на его основе, содержащих различные концентрации мелкодисперсной меди, стали и волокон целлюлозы. Также для сравнения были проведены испытания на модельных смесях с добавлением воды. Установлено, что модельные смеси, содержащие волокна целлюлозы показали наихудшие значения пробивного напряжения, а соответственно электрической прочности. Электрическая прочность снизилась в 3,7 раза, в то время как в присутствии воды электрическая прочность снизилась в 1,77 раза.

Ключевые слова: трансформаторное масло, механические примеси, электрические характеристики, электрическая прочность, пробивное напряжение

INFLUENCE OF MECHANICAL IMPURITIES ON DIELECTRIC STRENGTH OF TRANSFORMER OIL

L.R. Gaynullina, A.R. Fasykhov

The influence of mechanical impurities on dielectric strength of HC transformer oil has been studied. The breakdown voltage of HC oil and its model mixtures containing different concentrations of fine copper, steel, and cellulose fibers were measured. The tests using model mixtures with addition of water were carried out for comparison purposes. It was found that the model mixtures containing cellulose fibers showed the worst values of the breakdown voltage and dielectric strength, respectively. The dielectric strength decreased by 3,7 times, while in the presence of water, the dielectric strength decreased by 1,77 times.

Keywords: transformer oil, mechanical impurities, electrical characteristics, dielectric strength, breakdown voltage

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДПРОБИВНЫХ ПОЛЕЙ В ЖИДКОСТИ

Ю.А. Кузнецова, В.Б. Ясинский, С.М. Коробейников

В статье описана методика расшифровки экспериментальных керрограмм методом компьютерного моделирования условий, в которых они были получены. Расшифровка представляет собой решение обратной задачи восстановления поля напряжённости путём решения прямой задачи. В математической модели полностью воспроизводились условия реального эксперимента, и строилась матрица относительных интенсивностей. Для визуализации результатов расчёта был разработан специальный алгоритм, итогом которого было получение картины керровских полос, которая сравнивалась с экспериментальной. В случае несовпадения картин условия корректировались, и итерационный процесс продолжался до совпадения расчётной и экспериментальной керрограмм. В модель можно внести микропузырьки, объёмный заряд и стример. Разработанная методика, в случае наличия осциллограммы напряжения, позволяет воспроизводить не только статические картины полос Керра, но и хронограммы. Математическая модель позволяет не только ускорить обработку керрограмм, но и

получить дополнительную информацию о процессах, происходящих на предпробивной стадии в приэлектродной зоне. Что будет способствовать лучшему пониманию предпробивных процессов в жидкой изоляции высоковольтных энергоустановках.

Ключевые слова: пробой жидкостей, предпробивная стадия, электрооптический эффект Керра, двулучепреломление, разность фаз, микропузырьки, объемный заряд, математическое моделирование

SIMULATION OF PRE-BREAKDOWN FIELDS IN LIQUIDS

Yu.A. Kuznetsova, V.B. Yassinskiy, S.M. Korobeynikov

The article describes a technique for decoding experimental kerrograms by computer modeling of the conditions under which they were obtained. Decoding is a solution to the inverse problem associated with reconstruction of the intensity field by solving the direct problem. The conditions for a real life experiment, including the matrix of relative intensities were simulated in the mathematical model. A special algorithm was developed to visualize the calculation results, which was aimed to obtain a pattern of the Kerr bands, which was compared with the experimental pattern. In the case of mismatch between the patterns, the conditions were corrected, and the iteration process continued until the calculated and experimental kerrograms became similar. Microbubbles, a space charge, and streamer can be included in the model. The developed technique, in the presence of a voltage oscillogram, allows reproducing not only static Kerr band patterns, but also chronograms. The mathematical model can speed up both the procedure of kerrograms processing, and also obtain additional information relating the processes found at the pre-breakdown stage in the near-electrode zone. This will contribute to a better understanding of prebreakdown processes in liquid insulation of high-voltage power plants.

Keywords: breakdown of liquids, prebreakdown stage, electro-optical Kerr effect, birefringence, phase shift, microbubbles, space charge, mathematical simulation

СИЛОВОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСОВ НА ПРОВОДНИК

О.Б. Скворцов, В.И. Сташенко, О.А. Троицкий

Экспериментально установлено, что наибольшее силовое механическое действие электрический импульс оказывает в моменты его начала и окончания. Начальный и конечный моменты характеризуются созданием неравновесного распределения электрических полей как внутри, так и вне металлического проводника. Эти быстропротекающие процессы заканчиваются к моменту начала увеличения тока в проводнике и проявления скин-эффекта. В моменты начала и окончания внешнего электрического импульса возникают ударные механические напряжения в материале проводника. Динамические деформации происходят как вдоль оси проводника, так и в поперечном к этой оси направлении и зависят не только от величины, но и от полярности приложенного электрического импульса. Затем в материале проводника наблюдаются затухающие механические колебания, которые характеризуются частотами, существенно более низкими, чем частоты собственных электромагнитных колебаний в проводнике.

Ключевые слова: импульс тока, вибрация, механические напряжения, деформации, пинч-эффект, скин-эффект

MECHANICAL EFFECTS OF ELECTRICAL IMPULSES ON THE CONDUCTOR

O.B. Skvortsov, V.I. Stashenko, O.A. Troitsky

It has been experimentally established that the maximum mechanical effect of an electric impulse is exerted at its start and end points. The initial and final moments are characterized by a nonequilibrium distribution of electric fields both inside and outside the metal conductor. These fast flowing processes are completed by the moment when the current in the conductor increases and the skin effect occurs. At the start and completion of an external electric impulse, shock mechanical stresses occur in the conductor material. Dynamic deformations occur both along and transverse to the axis of the conductor, which depends not only on the magnitude, but also on the

polarity of the applied electric impulse. Therefore, damped mechanical oscillations are observed in the conductor material, which are characterized by the frequencies significantly lower than the frequencies of natural electromagnetic oscillations in the conductor.

Keywords: current impulse, oscillation, mechanical stress, deformation, pinch effect, skin effect

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ d-q

В.И. Доманов, Д.Г. Мурзаков, Д.С. Халиуллов

Рассмотрена схема замещения асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР). Составлена система дифференциальных уравнений АДФР с учетом режима удержания вала двигателя. Разработана структурная схема АДФР. Приведены графики переходных процессов электропривода в различных режимах. Проведен анализ работы двигателя при изменении напряжении ротора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, транзисторный регулятор напряжения, ШИМ, дифференциальный сельсин, двойное питание

MATHEMATICAL MODEL OF AN INDUCTION MOTOR WITH A WOUND ROTOR IN THE d-q COORDINATE SYSTEM

V.I. Domanov, D.G. Murzakov, D.S. Khaliullov

The article considers a scheme for replacement of an induction motor with a wound rotor (WRIM). A system of differential equations for the WRIM is given with regard to the mode of holding the motor shaft. A block diagram of the WRIM has been developed. The graphs of transient processes of the electric drive in various modes are given. An analysis of the motor operation under changes in the rotor voltage is carried out.

Keywords: induction motor, transistorized voltage regulator, PWM, differential selsyn, dual power supply

РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

М.И. Чупрыненко, К.С. Горячевский

В статье рассмотрены проблемы в эксплуатации КРУ 6-10 кВ, уже применяемые принципы работы защиты от дуговых замыканий 6-10 кВ и предложены новые принципы, позволяющие защите иметь абсолютную селективность, применение которых поможет уменьшить число аварий в секциях шин 6-10 кВ. Была создана принципиальная схема и разработан алгоритм действия защит, основанных на новых принципах. Рассмотрены преимущества и недостатки предлагаемого подхода к реализации дуговой защиты ячеек КРУ 6-10 кВ. Определено оборудование, необходимое для реализации новых принципов, предложены примеры необходимых комплектующих. Изучены возможности совмещения новых принципов с уже существующими защитами. Исследованы особенности оборудования, необходимые для установки защит на этих принципах на цифровые подстанции и преимущества этих защит в условиях цифровой подстанции.

Ключевые слова: релейная защита и автоматика, защита от дуговых замыканий, цифровая подстанция, электрическая сеть с изолированной нейтралью, однофазное замыкание на землю, волоконно-оптический датчик, пирометрический температурный датчик

IMPLEMENTATION OF ARC-FAULT PROTECTION IN A DIGITAL SUBSTATION AREA

M.I. Chuprynenko, K.S. Goryachevsky

The article discusses the problems in operation of 6-10 kV switchgears, reviews the available principles of protection against arc fault 6-10 kV, and suggests the new principles that ensure protection based on absolute selectivity. The use of the new principles will reduce the number of accidents in complete switchgears 6-10 kV. A schematic diagram and an algorithm for effective protection were developed based on these principles. The advantages and disadvantages of the proposed approach to implementation of arc protection 6-10 kV switchgear cells were evaluated. The facilities needed to implement these new principles, including the required component parts,

were defined. The possibilities for combining the new principles with the existing protection system have been analyzed. The focus has been made on the characteristics of the equipment required for the protection system at digital substations based on these principles, as well as advantages of the protection system performing in conditions of digital substations.

Keywords: relay protection and automation, arc fault protection, digital substation, electrical network with isolated neutral singlephase ground fault, fiber-optic sensor, pyrometric temperature sensor

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЛИПСНОСТИ СТАТОРА НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНОЙ СИНХРОННОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В.Н. Козловский, А.С. Саксонов

В работе приводятся результаты компьютерного моделирования влияния эллипсности статора синхронного генератора автомобильной генераторной установки типа 9402.3701-14М на электромагнитные параметры указанной электрической машины, такие как электромагнитная индукция в воздушном зазоре и магнитное напряжение этого воздушного зазора.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, автомобильная генераторная установка, синхронный генератор

COMPUTER MODELING FOR EFFECTS OF TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS IN FORMING STATOR ELLIPTICITY ON ELECTROMECHANICAL PROPERTIES OF VEHICULAR SYNCHRONOUS GENERATORS

V.N. Kozlovskiy, A.S. Saksonov

The article presents the results of computer simulation relating the influence of stator ellipticity of a synchronous generator in the vehicular generator 9402.3701-14M on electromagnetic parameters of the specified electric machine, including electromagnetic induction in the air gap and magnetic voltage of the given air gap.

Keywords: computer modeling, vehicular generator set, synchronous generator

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ С ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ

А.А. Андреев

В настоящий момент однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются наиболее частым видом повреждения в распределительных сетях среднего напряжения. Анализ замыканий на землю показывает, что отыскание ОЗЗ до сих пор является проблемой с неоднозначными решениями, особенно в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью. Существующие устройства защиты могут обеспечить селективное срабатывание в основном только в частных случаях, не относящихся к сетям с сильноразветвленной схемой и большим количеством отходящих присоединений. Поэтому с целью достоверного определения поврежденного присоединения во время однофазного замыкания на землю до сих пор применяются методы последовательного отключения. Для ограничения негативных последствий наиболее целесообразным в данных случаях является метод перегруппирования и разделения сети на участки. Выполнение оперативных переключений в ходе отыскания однофазных замыканий на землю рекомендуется проводить без перерыва электроснабжения потребителей, поэтому необходимо исследование переходного процесса, возникающего при объединении сетей на параллельную работу с целью проверки применимости предложенной методики.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, электроснабжение, оперативные переключения, изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль, кабельные линии

INVESTIGATION OF THE TRANSIENT PROCESS IN MEDIUM-VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS WITH A GROUND FAULT

A.A. Andreev

Currently, single-phase earth faults (SPEF) are the most common type of fault in the medium-voltage distribution networks. Analysis of ground faults shows that finding the SPEF is still an ambiguous case problem, particularly as regards the networks with isolated and compensated neutral. Existing protection devices can ensure selective response, mainly in particular cases not related to the networks with highly branched circuits and large number of outgoing connections. Therefore, in order to reliably determine a faulty connection, during a single-phase earth fault, sequential disconnection methods are still used. To limit the negative effects, in these cases the most appropriate method is associated with regrouping and dividing the network into sections. It is recommended to perform operational switching during the search for single-phase earth faults without interruption of power supply to consumers. Therefore, it is necessary to study the transient processes emerging when combining networks to perform parallel operations aimed to verify applicability of the proposed methodology.

Keywords: single-phase earth faults, power supply, operational switching, isolated neutral, compensated neutral, cable lines

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТАРИФОВ НА ЭНЕРГОРЕСУРСЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ С ЦЕЛЬЮ СТИМУЛИРОВАНИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ДОЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В БАЛАНСЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ

С.А. Александрович, Т.Г. Зорина

Проанализирована динамика тарифов на электрическую и тепловую энергию для нужд населения. Выполнен расчет уровня тарифа для населения на электрическую энергию, используемую для нужд отопления и горячего водоснабжения, равнозначного тарифу на тепловую энергию для этих целей. Разработаны направления совершенствования тарифной политики Республики Беларусь, которая будет способствовать стимулированию повышения доли электрической энергии в балансе энергоснабжения зданий. При решении поставленных задач применялся расчетно-аналитический метод и метод сравнительного анализа.

Ключевые слова: тарифная политика, динамика тарифов, электрическая энергия, тепловая энергия, совершенствования тарифной политики

IMPROVEMENT OF ENERGY TARIFFS IN THE REPUBLIC OF BELARUS IN ORDER TO STIMULATE AN INCREASE IN THE SHARE OF ELECTRICITY IN THE ENERGY BALANCE SYSTEM OF BUILDINGS

S.A. Aliaksandrovich, T.G. Zorina

The dynamics of tariffs for electric and thermal energy to satisfy the population needs is analyzed. The tariff level for the population for electric energy used in heating and hot water supply, equal to the tariff for thermal energy for the given purposes, has been estimated. The directions for improving the tariff policy in the Republic of Belarus have been developed, that will stimulate an increase in the share of electricity in the balance of energy supply to the buildings. When solving this set of tasks, the computational-analytical method and the method of comparative analysis were used.

Keywords: tariff policy, dynamics of tariffs, electric energy, heat energy, improvement of tariff policy