

Определение отключающей способности вакуумных дугогасительных камер по критерию отказа при использовании метода неразрушающих испытаний

РЫЛЬСКАЯ Л.А.

При исследовательских испытаниях вакуумных дугогасительных камер (ВДК) их отключающую способность определяют, доводя камеру до теплового отказа - такой ситуации, при которой ВДК отключить ток уже не может, и он отключается защитным выключателем испытательного стенда. Таким образом определяется наибольший ток короткого замыкания, который выключатель с ВДК может отключать в предписанных стандартом условиях. Этот ток характеризуется действующим значением его периодической составляющей и долей аperiodической составляющей в кривой тока. Однако если при отказе отдельные элементы ВДК (или она в целом) могут быть разрушены, это затруднит анализ причин отказа. В статье рассмотрен метод испытаний, при котором развитие отказа не допускается, а опасность отказа устанавливается по его первичным признакам. Показано, что такими признаками являются значительное время горения дуги до первого нуля тока и повторные зажигания дуги даже при низком восстанавливаемомся напряжении. Показано также, что для ВДК, контакты которых создают аксиальное магнитное поле, для определения номинального тока отключения можно пользоваться критерием отказа, в качестве которого принято критическое значение электрического заряда, перенесенного через вакуумную дугу до первого нуля тока. Такой критерий отказа дает возможность сократить число опытов, необходимых для определения номинального тока отключения. Приведены расчетные данные для определения значений критического заряда и номинального тока отключения.

Ключевые слова: вакуумная дугогасительная камера, номинальный ток отключения, переходное восстанавливаемоеся напряжение, межконтактный промежуток, кривая Пашена, отказ

When you research the test vacuum interrupters (vacuum interrupters) their breaking capacity is determined by bringing the camera up to the thermal failure - a situation in which vacuum interrupters to switch off the current cannot, and he turns off safety switch on the test stand. Thus, to determine the highest short-circuit current which the circuit breaker with vacuum interrupters can be disabled in the standard prescribed conditions. This current is characterized by the current value of its periodic component and an aperiodic component

shares current curve. However, if failure of individual elements VDK (or it in General) can be destroyed, this will make it difficult to analyze the reasons for the refusal. The article describes the method of testing in which the development of the failure is not allowed, and the risk of failure is established by its primary characteristics. It is shown that such characteristics are significant arcing time before the first current zero and the arc re-ignition even at low voltage recovering. It is also shown that for vacuum interrupters, the contacts which create the axial magnetic field, to determine the nominal off current is possible to use the criterion of failure, which adopted a critical value of the electric charge transferred through the vacuum arc to the first zero current. This criterion of failure provides the opportunity to reduce the number of experiments needed to determine the rated current of disconnection. Calculation data to determine values of critical charge and the rated current of disconnection.

Key words: vacuum interrupters, rated breaking current, transient recovery voltage, intercontact distance, Paschen curve, failure

Электротехника, 2016, №6, стр. 9-16

Предельная чувствительность локационного зондирования линий электропередачи при обнаружении гололедных отложений

МИНУЛЛИН Р.Г., АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., КАСИМОВ В.А., ФИЛИМОНОВА Т.К., ЯРУЛЛИН М.Р.

Гололедные отложения на линиях электропередачи (ЛЭП) обнаруживаются при их локационном зондировании по уменьшению амплитуды и увеличению времени распространения (запаздыванию) отраженных сигналов. В статье исследуется стабильность амплитуды и запаздывание отраженных импульсных сигналов при отсутствии гололеда и предельная чувствительность локационного метода. В результате многолетних измерений на действующих ЛЭП благодаря высокой чувствительности локационного метода обнаружены суточно-годовые вариации амплитуды U и запаздывания Δt отраженных сигналов, которые в основном обусловлены изменениями температуры окружающей среды. С увеличением длины трассы интервал регулярных вариаций этих параметров увеличивается. Экспериментально показано, что вариации параметров U и Δt имеют также случайную составляющую, обусловленную влиянием ветровых воздействий и помех различного рода, которые постоянно присутствуют в высокочастотных каналах линий электропередачи. Установлено, что экспериментальные распределения $P(U)$ и

$P(\Delta\tau)$ близки к нормальному закону. Получена статистическая зависимость параметра $\Delta\tau$ от изменения температуры окружающей среды, связанная с удлинением проводов линий электропередачи. Показано, что вариации параметров U и $\Delta\tau$ в совокупности со случайными флуктуациями в штатном режиме намного меньше изменений амплитуды и запаздывания сигналов при раннем появлении гололедных отложений. Даются рекомендации относительно выбора уставок (порогов срабатывания) по амплитуде и запаздыванию при обнаружении гололеда и повреждений на ЛЭП локационным методом. Выбор уставок по этим параметрам с учетом их суточных и годовых вариаций повышает чувствительность системы локационного мониторинга воздушных линий электропередачи. Установлено, что флуктуационные изменения параметров U и $\Delta\tau$, а также их суточные и годовые вариации в штатных условиях не влияют на точность регистрации повреждений и гололедных образований на проводах ЛЭП.

Ключевые слова: линии электропередачи, гололедные отложения, локационное зондирование, чувствительность локационного метода

Ice accumulation on electric power lines is detected using location probing by amplitude decay and prolonged transmission time (transmission delay) of reflected signals during location probing. The authors study the threshold sensitivity of location method and stability of amplitude U and transmission delay $\Delta\tau$ of reflected signals in the normal operation mode in the absence of ice. Due to long-term investigations of the active power lines and high sensitivity of location method the authors discovered annual and daily variations in amplitude and transmission delay of reflected signals, which mostly depend on changes in environmental temperature. Interval of regular variations of U and $\Delta\tau$ increases with the path length. As evidenced by experimental data, variations of U and $\Delta\tau$ also have a random component attributed to the impact of wind and contaminating signals which are always present in high frequency channels of electric power lines. Experimental distribution of $P(U)$ and $P(\Delta\tau)$ is close to normal. Statistical relationship between $\Delta\tau$ and changes in environmental temperature, which cause thermal elongation of conductors, is reported. Variations in U and $\Delta\tau$ as well as sporadic fluctuations in the normal operation mode are far less than the changes in signal amplitude and transmission delay at the early stage of ice accumulation. Guidelines to set operation threshold for detecting early ice accretion on electric power lines and wire breakage by amplitude and transmission delay are given. Setting operation threshold taking into account daily and annual variations of U and $\Delta\tau$ improves sensitivity of location monitoring of overhead power lines. Sporadic fluctuations

of U and $\Delta\tau$ or their daily and annual variations in normal operation mode appear to have negligible effect on detecting ice accumulation and wire breakage.

Key words: electric power lines, location monitoring, detecting ice accretion and wire breakage, location method sensitivity

Электротехника, 2016, №6, стр. 16-21

Индикатор дефекта высоковольтной изолирующей конструкции

ЗАРИПОВ Д.К., БАЛОБАНОВ Р.Н.

Для контроля состояния изоляции электрооборудования высокого напряжения применяются различные устройства, в том числе, встроенные в конструкцию. В статье рассмотрена возможность использования в качестве таких устройств оптических индикаторов - световых излучателей, устанавливаемых на изолирующие конструкции высоковольтных линий и подстанций. Принцип работы таких индикаторов основан на том, что распределение электрического поля вдоль изолирующей конструкции изменяется при нарушении целостности отдельных ее частей, когда разность потенциалов на поврежденной части конструкции уменьшается, на неповрежденной - соответственно, увеличивается. Дефектное состояние изолирующей конструкции может быть обнаружено по интенсивности свечения индикатора, установленного на участке изолирующей конструкции или опоре. Эксперименты показали, что такая регистрация повреждения изоляции может выполняться визуально, без дополнительных приборов, например, в ходе очередных осмотров оборудования. Показано, что возможно создание индикаторов простых в изготовлении и не требующих дополнительного технического обслуживания.

Ключевые слова: высоковольтная изоляция, дефект изоляции, встроенные системы контроля состояния изоляции, оптический индикатор дефекта изоляции.

Insulation plays one of the main roles in the reliable operation of high voltage electrical equipment. In recent years, there has been a trend of creating insulation constructions with additional or built-in control of their condition devices. The article describes the possibility of using such devices as light emitters, mounted on insulation construction of high voltage lines and substations. The operating principle of the optical indicator is based on the following. The

electric field distribution along the insulation structure is changed in case of violation the integrity of its individual parts. The difference of potentials on the damaged section is reduced, which causes an increase in the voltage near the undamaged part of the structure. Defective condition of the insulating structure can be found on indicator light intensity, installed on section of the insulating part of structure; the brightness of the glow is dependent on the voltage drop across its terminals. The experiments showed that the glowing of indicators may be detected visually without additional devices, for example, during the regular equipment inspection. It's possible to create indicators easy to manufacture and do not require additional maintenance.

Key words: high voltage insulation, insulation defect, integrated insulation monitoring system, an optical insulation defect indicator.

Электротехника, 2016, №6, стр. 21-25

Имитационная модель системы электроснабжения кислородно-конвертерного производства для анализа коммутационных перенапряжений

ШПИГАНОВИЧ А.Н., ПУШНИЦА К.А.

В статье рассматриваются коммутационные перенапряжения, возникающие в системе электроснабжения кислородно-конвертерного производства при срабатывании вакуумного выключателя. Анализируются особенности таких систем и приводится типовая схема электроснабжения. Отмечено, что в результате особенностей гашения дуги в вакууме (срез тока, эскалация напряжения, повторные зажигания дуги) могут возникать перенапряжения, имеющие высокочастотный характер и оказывающие негативное влияние на электродвигатели, изоляция которых обладает наименьшим запасом диэлектрической прочности. Традиционные средства защиты от перенапряжений, такие как разрядники, нелинейные ограничители перенапряжений, искровые промежутки, при высокочастотных перенапряжениях малоэффективны, что связано с резким подъемом их вольт-секундных характеристик при малых длительностях импульсов. В статье предлагается в качестве средства защиты от подобных перенапряжений использовать RC-цепочки, сопровождая их применение достаточно точным моделированием, так как неправильный выбор их параметров может ухудшить процесс коммутации.

Рассматриваются основные особенности построения имитационной модели для

исследования коммутационных перенапряжений и анализа работы средств защиты. Также представлены внешний вид имитационной модели и результаты ее работы. Проведена оценка адекватности предложенной модели.

Ключевые слова: коммутационные перенапряжения, моделирование, системы электроснабжения, вакуумный выключатель.

This paper considers switching overvoltages that occurring in power supply system of the oxygen-converter manufacture then vacuum circuit breaker is triggered. Analyzes the characteristics of such systems and provides typical power supply scheme. It is noted that as a result of the features of arc interruption in vacuum (current chopping, voltage escalation, arc re-ignition) can occur overvoltages with high frequency nature, which have a negative effect on motors, which insulation has the lowest margin of dielectric strength. Traditional means of overvoltage protection, such as conventional spark-gapped arresters, metal-oxide surge arresters, spark gaps in high frequency overvoltages nature is ineffective, due to a sharp rise of their volt-second characteristics at short pulse duration. The article is offered as a means of protection from such overvoltages to use RC-chains, accompanying their application with sufficiently accurate modeling because the wrong choice of their parameters may even worsen the commutation process. Considers the main features of the construction of simulation model for investigation of switching overvoltages and analysis of means of protection. Also presents appearance of the simulation model and its results. The assessment of adequacy of the offered model is carried out.

Key words: switching overvoltages, modeling, power supply system, vacuum breaker.

Электротехника, 2016, №6, стр. 25-31

Электромеханические ресурсы частотно-регулируемого синхронного электропривода в непрерывных периодических режимах работы

ШРЕЙНЕР Р.Т., МЕДВЕДЕВ А.В. ПОЛЯКОВ В.Н.

Рассмотрена возможность повышения перегрузочной способности и снижения потерь мощности в частотно-регулируемом синхронном электроприводе, работающем в непрерывном периодическом режиме. Дано определение непрерывного периодического режима. Приведена функциональная схема системы векторного управления синхронного

электропривода. Сформулирована постановка задачи исследования электропривода. Описана методика моделирования синхронного электропривода, выявляющая предельно допустимые по нагреву нагрузки синхронного двигателя. Приведены результаты моделирования непрерывного периодического режима работы явнополюсного синхронного двигателя при постоянном и оптимальном регулировании магнитного потока якоря. Выявлен ресурс синхронного двигателя по критерию допустимого по нагреву момента двигателя. Проведен сравнительный анализ потерь мощности синхронного двигателя в непрерывном периодическом режиме при постоянном и оптимальном регулировании магнитного потока якоря. Дано заключение об эффективности использования оптимального регулирования магнитного потока якоря в системах векторного управления синхронных электроприводов, работающих в непрерывном периодическом режиме.

Ключевые слова: синхронный электропривод, явнополюсный синхронный двигатель, непрерывный периодический режим, ресурс по перегрузке, энергосбережение

Capacity of increasing overload capability and reducing watt loss in variable-frequency synchronous drive that running in a continuous periodic mode is described. Continuous periodic mode definition is given. A functional diagram of synchronous drive vector control system are presented. Statement of electric drive analysis problem is formulated. Procedure of synchronous drive modeling which enable to define maximum allowable motor temperature loads are described. The results of computer modeling of continuous periodic operational modes of the motor with continuous and optimal regulation of armature magnetic flux are given. Resource of salient pole synchronous motor in respect of maximum allowable motor temperature and torque is defined. Comparative analysis of power losses in synchronous motor during operation of frequency-variable synchronous motor in continuous periodic modes with continuous and optimal regulation of armature magnetic flux is carried out. The conclusion is made about efficiency of use of optimal armature magnetic flux regulation in vector control systems of synchronous drives that operate in continuous periodic modes.

Key words: synchronous electric drive, salient pole motor, continuous periodic operational modes, overload resource, energy saving.

Математическое моделирование высокоскоростной однофазной машины с переменным направлением потока

ДМИТРИЕВСКИЙ В.А., ПРАХТ В.А.

В статье описываются новая конструкция однофазной электрической машины с переменным направлением потока (ЭМПНП) и процедура математического моделирования ЭМПНП. По техническим характеристикам (таким как КПД, удельная мощность и удельный момент) ЭМПНП близки к синхронным машинам с магнитами на роторе, но превосходят их по надежности при проектировании высокоскоростных приложений. Основные преимущества ЭМПНП – отсутствие постоянных магнитов или обмотки на вращающемся роторе и размещение постоянных магнитов на статоре. Новая конструкция однофазной ЭМПНП содержит ротор с четырьмя зубцами и статор с четырьмя зубцами, обмотку на статоре, а также магнитную систему. Магнитная система, расположенная на поверхности зубцов статора, имеет по два магнита на каждом зубце статора и создает на каждом из них по два магнитных полюса. Соседние полюса, расположенные на соседних зубцах статора, являются одноименными. В новой конструкции однофазной ЭМПНП суммарный угловой размер зубцов статора чуть меньше длины окружности. Поэтому поверхность статора гораздо лучше используется (по сравнению с прототипом), что приводит к увеличению удельной мощности и повышению КПД, а также к снижению стоимости ЭМПНП. Предложена методика математического моделирования ЭМПНП, основанная на решении ряда магнитостатических задач с общей геометрией, при этом различные положения ротора моделируются посредством сшивающих граничных условий. Методика позволяет оценить электрические потери в стали и в магнитах на этапе постпроцессинга.

Ключевые слова: электрическая машина с переменным направлением потока, высокоскоростной электродвигатель, математическое моделирование.

In this paper a new single-phase flux reversal machine (FRM) design and its mathematical model are described. Technical features of FRM (such as efficiency, specific power and specific torque) are close to those of synchronous motors with the magnets on the rotor and exceed them in reliability for high speed applications. The main advantage of FRM is the absence of permanent magnets or electric conductors on a rotating rotor, and placing the permanent magnets on the stator. A new single-phase FRM consists of rotor having four teeth, stator

having four teeth and magnetic system. The magnetic system is arranged on the stator teeth surface, has two magnets on each stator tooth and creates two magnetic poles on each of them. Unlike the prototype (well-known modification of FRM) nearby poles located on adjacent stator teeth are similarly magnetized, whereby in new single-phase FRM the total angular size of the stator teeth just slightly less than one of the circle. That is why, the stator surface is much better used (as compared to well-known modification of FRM), which results in increasing the specific power and the power efficiency as well as decreasing the new FRM cost. The proposed FRM model is based upon solving the magnetostatic problems with common geometry wherein different position of the rotor is modeled by the joining boundary conditions. The model allows evaluating the electrical losses in the steel and magnets on the postprocessing stage.

Key words: flux reversal machine, high speed motor, mathematical modeling.

Электротехника, 2016, №6, стр. 38-44

Экспериментальное исследование рабочих характеристик асинхронного двигателя при импульсном питании

ШЕСТАКОВ А.В., ЖЕЛНИН В.В., ИСМИЕВ Р.Н.

В статье изложены основы методики расчета рабочих характеристик управляемых асинхронных двигателей (АД), питаемых импульсным напряжением. Предлагаемая модель основана на Г-образной схеме замещения для каждой из гармоник, на которые раскладывается кривая приложенного к фазе напряжения. Увеличение магнитных потерь в стали от гистерезиса предложено оценивать пропорционально пиковому значению импульсного напряжения. Влияние ШИМ-напряжения на магнитные потери от гистерезиса оценивается с помощью коэффициента, зависящего от действующих значений основной и высших гармоник ЭДС и напряжений, а также коэффициента, учитывающего увеличение электрического сопротивления стали вследствие поверхностного эффекта. Аналогичным способом предложено учитывать магнитные потери в роторе, которые обусловлены только влиянием высших гармоник. Увеличение активного и снижение индуктивного сопротивлений короткозамкнутого ротора от влияния токов высших гармоник предложено оценивать по известной методике «Интерэлектро». Результирующие значения потребляемого тока, коэффициента

мощности, полезной и потребляемой мощности АД с импульсным напряжением питания рассчитываются с учетом суммарного влияния токов и напряжений основной и высших гармоник. На основе изложенной методики составлена программа и выполнено моделирование рабочих характеристик АД мощностью 180 Вт, питаемого от ШИМ-инвертора с частотой основной гармоники 50 Гц. При этом гармонический состав импульсного напряжения был получен путем обработки осциллограмм, снятых с фазных обмоток двигателя, питаемого от преобразователя частоты. Для опытной проверки предложенной модели была смонтирована установка для нагружения АД, и определены рабочие характеристики АД при частоте основной гармоники 50 Гц. Результаты эксперимента показали удовлетворительную сходимость с результатами расчета, что позволяет рекомендовать предложенную методику для оценки энергетических показателей частотно-управляемых асинхронных двигателей.

Ключевые слова: частотно-управляемый асинхронный двигатель, высшие гармоники напряжения питания, магнитные потери, рабочие характеристики, экспериментальные исследования.

The fundamentals of design procedure of performance data of the controlled asynchronous motors fed by pulse voltage are stated in the article. The G-shaped equivalent circuit is put in a technique basis for each of harmonics on which the curve of the voltage enclosed to a phase is displayed. The magnetic iron losses caused by hysteresis increasing is asked to rate in proportion to the peak value of the pulse voltage. The influence of PWM-voltage on magnetic hysteresis losses is estimated by using the coefficient depending on the effective values of main and higher harmonics of the EMF and voltages, as well as the coefficient taking into account the increase of electrical resistance of iron due to skin-effect. In a similar way proposed to account for magnetic losses in the rotor due only to the influence of higher harmonics. The increase of resistance and decrease of the inductances of short-circuited rotor caused by the influence of higher harmonics currents is proposed to evaluate by well-known methods of «InterElectro». The resulting values of consumption current, power factor, utility power and consumption power of the asynchronous motor with pulse voltage are calculated with a total impact of currents and voltages of the main and higher harmonics. Based on the presented methodology, a program was made, and modeling the performance data of the induction motor power 180 W, fed by a PWM-inverter with a fundamental frequency of 50 Hz. In this case the harmonic structure of the pulse voltage was obtained by processing the oscillograms taken from phase

windings of the motor fed by the frequency converter. To experimental verification of the proposed model an experimental setup for loading of the asynchronous motor was mounted, and the measurement of the performance data of asynchronous motor mentioned previously with the frequency of main harmonic of 50 Hz was made. The results of the experiment showed satisfactory convergence with the experimental results, which allows to recommend the proposed methodology to evaluation of the energy performance of frequency-controlled asynchronous motors.

Key words: frequency-controlled asynchronous motor, the higher harmonics of fed voltage, magnetic losses, performance data, experimental analysis.

Электротехника, 2016, №6, стр. 45-52

Разработка унифицированных схемотехнических решений для системы управления и сбора данных исследовательского комплекса на базе электронно-лучевой технологической установки

ЩЕРБАКОВ А.В., РУБЦОВ В.П., КОЖЕЧЕНКО А.С., ИВАЩЕНКО М.В.

Рассмотрены структура и режимы работы электрооборудования, входящего в состав экспериментального стенда для исследования характеристик электронных пушек технологического назначения. Приведен перечень решаемых с помощью этого оборудования задач, на базе которого разработаны основные требования к системе управления и сбора данных. Проведена классификация управляющих и регистрируемых сигналов и по ней определены характеристики модулей ввода-вывода цифровых и аналоговых сигналов. С учетом особенностей функционирования оборудования разработаны унифицированные схемотехнические решения, обеспечивающие приемлемую точность управления и регистрации сигналов, а также безаварийную работу компьютеризированной системы сбора данных. Уделено внимание использованию современных средств, обеспечивающих гальваническую развязку по оптическим каналам при передаче как цифровых, так и аналоговых сигналов. Предложена методика выбора специализированных микросхем по параметрам управляющих и измеряемых сигналов. Приведены рекомендации по применению измерительного комплекса для исследования и проектирования систем управления сварочных электронно-лучевых установок.

Ключевые слова: электронно-лучевая технология, система управления, система сбора данных, защита измерительных цепей, гальваническая развязка.

The structure, contents and operations of electrical equipment, which are a part of the test bench for investigating the characteristics of technological electron guns reviewed. A list of critical problems which solved with the equipment, under which the basic requirements for system control and data acquisition were designed, is shown. Based on the classification of the control and recorded signals, the characteristics of input-output modules of digital and analog signals were defined. Taking into account features of the equipment standardized circuit solutions developed that provide acceptable accuracy for control and signaling, as well as trouble-free operation of a computerized data acquisition system. The use of modern solutions providing galvanic isolation by optical transmission channel technology both for digital and analog signals is attended. The method of selection of specialized microchips on the parameters of control and measurement signals is shown. Recommendations on the use of measuring complex for research and design of control systems of electron beam welding installations are provided.

Key words: electron-beam technology, control system, data acquisition system, the protection of measuring circuits, electrical isolation.

Электротехника, 2016, №6, стр. 53-57

Оптимизация магнитной системы бесконтактного электродвигателя постоянного тока с редкоземельными постоянными магнитами

ВОЛОКИТИНА Е.В., ВЛАСОВ А.И., ОПАЛЕВ Ю.Г., ЮРЛОВА О.А.

Рассмотрены причины возникновения пульсаций реактивного момента в обесточенном бесконтактном электродвигателе постоянного тока (БДПТ) с зубцовым статором и магнитоэлектрическим возбуждением. Предложен метод снижения пульсаций реактивного момента с целью улучшения равномерности скорости вращения БДПТ. Метод основан на оптимальном выборе числа пазов статора, которое определяет тип обмотки статора при заданном числе полюсов магнитоэлектрической машины. Для максимально возможного снижения пульсаций реактивного момента дополнительно предлагается выполнять скос пазов статора на угол, кратный периоду основной зубцовой

гармоники. Все аналитические расчеты выполнены с применением численных методов математического моделирования магнитного поля магнитоэлектрической машины в специализированном программном обеспечении Elcut. На основании результатов расчетов разработаны рекомендации для проектирования БДПТ с минимальными пульсациями реактивного момента. Теоретические исследования подтверждены экспериментами на электродвигателях ДБМ142-18-3 и реализованы в БДПТ серии ДБМ производства ОАО "Электропривод" г. Киров. Электродвигатели серии ДБМ предназначены для прецизионных электроприводов металлообрабатывающего оборудования, основным требованием к которым является высокая равномерность скорости вращения.

Ключевые слова: бесконтактный электродвигатель постоянного тока, постоянный магнит, реактивный момент, скос пазов, моделирование магнитного поля.

This article discusses the reasons of cogging torque pulsations of de-energized brushless DC motor (BLDC) with tooth stator and magnetolectricity stimulation. Based on the identified causes we proposed a method to reduce cogging torque pulsations in order to improve the rotation speed uniformity of BLDC. The method is based on the optimal choice of the number of stator slots, that determines the type of stator winding for a given number of poles magneto-electric machines. For the maximum possible reduction of cogging torque pulsations it is proposed to perform the bevel angle on the stator slots, Divisible by main tooth harmonic period. All analytical calculations were performed with the use of numerical methods for mathematical modeling of the magnetic field in the magneto-electric machines applying specialized software Elcut. Based on the results of the calculations recommendations for the design BLDC with a minimum value of the cogging torque pulsations were developed. These theoretical studies in the article have been confirmed by experimental studies of DBM142-18-3 motor and implemented in BLDC (DBM series) produced by JSC "Electroprivod" Kirov. Electric motors of DBM series were designed for precision electric drive for metalworking equipment, the main requirement for it is an high uniformity rotation speed.

Key words: brushless DC motor, permanent magnets, cogging torque, slot skewing, modeling of a magnetic field

О применении силиконовых жидкостей в силовых трансформаторах

БОРИН В.Н., КОВАЛЕВ В.Д., ЧУЙКОВ С.Ю.

Рассмотрены изоляционные и основные физические характеристики изоляционных жидкостей Мидель 7131(сложный эфир) и СОФЭКСИЛ-ТСЖ (силиконовая жидкость). Показано, что жидкость СОФЭКСИЛ-ТСЖ характеризуется большей температурой вспышки, что важно для обеспечения пожаробезопасности высоковольтного электрооборудования. Ввиду противоречивости данных по электрической прочности силиконовых жидкостей выполнены исследования электрической прочности жидкости СОФЭКСИЛ ТСЖ и трансформаторного масла в резконеоднородных полях при воздействии импульсного напряжения 1,2/50 мкс обеих полярностей. Показано, что электрическая прочность жидкости СОФЭКСИЛ-ТСЖ аналогична электрической прочности трансформаторного масла марки ГК и жидкости MIDEL 7131. Сделан вывод о том, что жидкость СОФЭКСИЛ-ТСЖ может быть применима для силовых трансформаторов в случаях, когда предъявляются повышенные требования по пожарной безопасности.

Ключевые слова: силовой трансформатор, электрическая прочность, изоляционная жидкость, пожаробезопасность

With the purpose of creation of fireproof power transformers the insulating and physical characteristics of liquids Midel 7131 (complex ester) and SOFEXIL-TSJ (silicone liquid) were considered. The silicone liquid SOFEXIL-TSJ is characterized by more flash temperature that is important for maintenance of fire safety of high-voltage electric equipment. In view of discrepancy of electric strength of silicone liquids researches of electric strength of liquid SOFEXIL-TSJ and, for comparison, transformer oil are executed in high non-uniform fields under impulse voltage 1,2/50 мкс of both polarities. It is received, that electric strength of liquid SOFEXIL-TSJ is similar to electric strength of transformer oil of mark GK, and also similar to electric strength of liquid MIDEL 7131. On the basis of the principal physical characteristics of liquid SOFEXIL-TSJ and results of the executed researches it is drawn the conclusion that liquid SOFEXIL-TSJ can be used for power transformers in cases when increased requirements on fire safety are occurred.

Key words: power transformer, electrical strength, insulating liquid, fireproof

Электромеханическое преобразование энергии в системе с объемным высокотемпературным сверхпроводником. Ч. 1. Математическое моделирование процессов

ДЕРГАЧЕВ П.А., КУЛАЕВ Ю.В., КУРБАТОВ П.А., КУРБАТОВА Е.П.

Рассматриваются особенности преобразования энергии в линейном электромеханическом вибрационном устройстве с элементом из высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) материала. Постоянный магнит в форме диска с осевой намагниченностью перемещается внутри неподвижной кольцеобразной катушки, а керамический ВТСП элемент, также имеющий форму диска, закреплен неподвижно на некотором расстоянии от постоянного магнита. Все элементы преобразователя расположены соосно. Перевод ВТСП в сверхпроводящее состояние осуществляется в магнитном поле постоянного магнита. Цель исследований - выяснить влияние ВТСП элемента на статические и динамические параметры преобразователя, сравнить работу устройства с ВТСП элементом и без него. Предложены математические модели для расчетов динамических показателей устройства, составленные в программной среде MatlabSimulink для электрической и механической подсистем. Связь между подсистемами определяется функциями потокоцепления катушки и электромагнитной силы, которые получаются из анализа электромагнитного поля методом пространственных интегральных уравнений с учетом свойств ВТСП материала. Предложена комбинированная модель свойств ВТСП материала с двумя источниками магнитного поля: плотностью тока и намагниченностью, которая обладает большей универсальностью, чем модели только для токов.

Ключевые слова: объемный высокотемпературный сверхпроводник, электромеханический преобразователь, постоянный магнит, математическая модель, расчет

This article considers the features of the conversion of energy in linear vibration electromechanical device with the high-temperature superconducting (HTS) element. The disk permanent magnet with axial magnetization moves inside the fixed annular coil, and a ceramic HTS element, also having a disk shape, is fixed at a distance from the permanent magnet. All elements of the converter are arranged coaxially. Transition of HTS to the superconducting is performed in a magnetic field of the permanent magnet. The purpose of research was to

determine the influence of HTS element on the static and dynamic parameters of the converter by comparing the analysis data of devices with HTS element and without it. The mathematical models for the calculation of the dynamics of the device, created in Matlab Simulink for electrical and mechanical subsystems, are presented. Connection between the subsystems is defined by functions of flux linkage of the coil and the electromagnetic force, which are obtained from the analysis of the electromagnetic field by the spatial integral equations taking into account the properties of HTS material. In addition, there is the combined model of properties of HTS material with two sources of the magnetic field: current density and magnetization, which is more versatility than current models only.

Key words: bulk high-temperature superconductors electromechanical convertor, permanent magnet, mathematical model, calculation

Электротехника, 2016, №6, стр. 68-68

И.Б. ПЕШКОВУ – 80 лет