

Электротехника, 2018, №1, стр. 2-3

**55 лет кафедре электромеханики Уфимского государственного авиационного
технического университета**

Электротехника, 2018, №1, стр. 3-7

**Интеллектуальный стартер-генератор для системы электроснабжения летательного
аппарата с повышенным постоянным напряжением**

КИСЕЛЁВ М.А., ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ВАВИЛОВ В.Е., ПАШАЛИ Д.Ю., БАБИКОВА Н.Л.

Приведены результаты исследований интеллектуального стартер-генератора (СГ) мощностью 16 кВА и частотой вращения 12000 об/мин. При проектировании СГ был принят междисциплинарный подход, который заключается в том, что все расчеты электрической машины взаимосвязаны и представляют собой симбиоз электромагнитных, тепловых и механических расчетов с учетом динамики ротора. При таких расчетах с помощью генетических алгоритмов одновременно решаются взаимосвязанные оптимизационные задачи. Такой подход позволяет обеспечить максимальную точность, особенно при проектировании высоконагруженных электрических машин, где даже незначительное изменение какого-либо параметра может привести к существенному изменению конструктивной схемы СГ и его размеров. Экспериментальный образец СГ был испытан в режиме полной мощности при номинальных оборотах. Результаты измерений выходного напряжения и температуры нагрева активных элементов соответствуют расчетным. Отклонение от расчетных данных по напряжению составило 1,7 %. Столь малая погрешность подтверждает эффективность используемых методов междисциплинарного проектирования. По результатам испытаний выполнено сравнение с характеристиками авиационными генераторами аналогичной мощности и показана эффективность разработанного СГ.

Ключевые слова: летательные аппараты, система электроснабжения, интеллектуальный стартер-генератор, магнитоэлектрический генератор.

The article presents research of an intelligent starter-generator (SG) with a power of 16 kVA and a rotational speed of 12,000 rpm. To design the SG, a multidisciplinary approach was used, which consists in the fact that all calculations of an electrical machine are interdependent and

represent a symbiosis of electromagnetic, thermal and mechanical calculations, taking into account the rotor dynamics. The interconnected optimization tasks are simultaneously solved by using genetic algorithms. This approach allows ensuring maximum accuracy, especially to design high-loaded electric machines, where even an insignificant change in any parameter can lead to a significant change in the SG structural scheme and its geometric dimensions. Based on the calculation results, an experimental SG model was developed, which was tested at the full power and rated speed. The measurement results of the output voltage and heating temperature of the active elements correspond to the calculated ones. The deviation from the calculated voltage data was 1.7 %. Such a small error confirms the effectiveness of the multidisciplinary design methods used. Based on the test results, a comparison with aircraft generators of similar power shown the efficiency of the developed product.

Key words: aircraft, power supply system, intelligent starter-generator, magnetoelectric generator.

Электротехника, 2018, №1, стр. 8-11

Оптимизация конструктивных схем стартер-генератора для транспортных средств с гибридной силовой установкой

ИСМАГИЛОВ Ф.Р., РОГИНСКАЯ Л.Э., БЕКУЗИН В.И., МИНИЯРОВ А.Х., САЯХОВ И.Ф.

Приведены результаты исследований стартер-генераторов транспортных средств с гибридной силовой установкой. Объектом исследования были два стартер-генератора с различными обмотками: с зубцовой, концентрической обмоткой и распределенной обмоткой 3x2. Оптимизация выполнена методом генетического алгоритма при помощи программного комплекса AnsysMaxwell. В статье рассмотрена оптимизация выбора немагнитного зазора с целью минимизации негативного влияния реакции якоря на поле возбуждения постоянных магнитов.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, стартер-генератор, многофазный генератор, оптимизация.

The article contains research on optimization of starter-generators of vehicles with a hybrid power plant. The research objects were two starter-generators with different winding types:

tooth-coiled, concentrated and distributed 3x2 windings. The novelty of the study is that optimization is carried out using the genetic algorithm in the Ansys Maxwell software package. In this paper, we consider optimization of the non-magnetic gap selection, in order to minimize the negative effect of the armature reaction of the excitation permanent magnet field.

Key words: hybrid power plant, starter-generator, multiphase generator, optimization.

Электротехника, 2018, №1, стр. 12-16

Об эффективном соотношении традиционных и возобновляемых источников энергии в электроэнергетике России

ГАЙНАНОВ Д.А., КАШИРИНА Е.С., ХАБИРОВА Я.Ф.

Рассмотрена задача определения эффективного соотношения использования традиционных и возобновляемых источников энергии, а также построения прогнозных оценок развития сферы электроэнергетики РФ. Для обоснования правильности целевых ориентиров предложено использовать концептуальную модель использования возобновляемых и традиционных источников энергии, разработанную на основе дифференциальных уравнений Лотки-Вольтерра. Идентификация коэффициентов системы дифференциальных уравнений выполнена на основании данных официальной статистической отчетности. Дана оценка корректности целевых ориентиров для доли электроэнергии, произведенной на базе возобновляемых источников энергии. Приведены рекомендации по увеличению доли возобновляемых источников энергии в энергетике России.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, возобновляемые источники энергии, тенденции энергопотребления, математическое моделирование, модель Лотки-Вольтерра.

The problem arises of determining the effective ratio of the use of traditional and renewable energy sources is considered, as well as the construction of predictive estimates of the electric power industry development in the Russian Federation. To justify the target correctness, a conceptual model based on the Lotka-Volterra differential equations for the use of renewable and traditional energy sources was proposed. Identification of the coefficients of the differential equation system was carried out based on the data of the official statistical reporting of the Russian Federation. The article provides an assessment of the correctness of the targets for the

share of electricity produced based on renewable energy sources. Recommendations are given on increasing the share of renewable energy sources in the Russian Federation.

Key words: energy system, renewable energy sources, energy consumption trends, mathematical modeling, Lotka-Volterra model.

Электротехника, 2018, №1, ст р. 16-21

Сверхвысокооборотный стартер-генератор с магнитопроводом из аморфного железа для беспилотного летательного аппарата

ВАВИЛОВ В.Е., ЮШКОВА О.А., РАХМАНОВА Ю.В., АФАНАСЬЕВ Ю.В., ПОТАПЧУК Н.К.

Приведены результаты исследований высокооборотного стартер-генератора с постоянными магнитами и зубцовой обмоткой для перспективных беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены технология изготовления магнитопровода статора из аморфного железа, а также методика выбора числа пар полюсов высокооборотного стартер-генератора, обоснованы преимущества аморфного железа. Отдельный этап работы посвящен задачам оптимизации пазовой зоны стартер-генератора по критерию минимума потерь в постоянных магнитах на вихревые токи. Для минимизации этих потерь выполнена многокритериальная оптимизация пазовой зоны с помощью генетических алгоритмов, в результате которой потери были снижены в 4 раза относительно первоначального варианта. Предложена схема охлаждения синхронной машины в составе турбореактивного двигателя, проведены тепловые расчеты. Для верификации предложенной последовательности проектирования, а также для оценки эффективности использования аморфного железа создан полноразмерный макет мощностью 5 кВт с частотой вращения ротора 60000 об/мин, плотностью мощности 0,2 кг/кВт и КПД 96,4 %. Первоначальные испытания экспериментального макета подтвердили теоретические выводы и показали, что применение аморфного железа позволяет снизить потери в магнитопроводе статора в 5–7 раз.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, сверхвысокооборотный стартер-генератор, магнитопровод, аморфное железо.

The paper presents the research of a ultra high-speed starter-generator with permanent magnets and a tooth-coil winding for promising unmanned aerial vehicles. The novelty of the research is

the use of amorphous iron as the material for the magnetic core. A lot of attention is paid to the technology of manufacturing stator cores from the amorphous iron, experimental samples are shown. The problem of choosing the number of pairs of poles of a high-speed starter-generator is considered and the advantages of amorphous iron are substantiated. A separate part of the work is devoted to the optimization of the slotted zone of the starter-generator by the criterion of the minimum eddy currents losses in permanent magnets. To minimize eddy currents losses in permanent magnets the multicriteria optimization of the slotted zone using genetic algorithms were made. As a result of optimization the eddy currents losses in permanent magnet were reduced by 4 times compared with the original version. A cooling scheme of synchronous electric machine with permanent magnets as part of turbojet engine was proposed and thermal calculations were performed. To verify the proposed design sequence as well as to evaluate the efficiency of the use of amorphous iron a full-scale experimental model was created (power is 5 kW, rotational speed is 60,000 rpm, a power density is 0.2 kg / kW and an efficiency is 96.4%). The initial tests of the experimental model confirmed all our theoretical conclusions and showed that the use of amorphous iron makes it possible to reduce losses in the magnetic core of the synchronous electric machine with permanent magnets stator by 5-7 times.

Key words: unmanned aerial vehicles, super-high-speed starter-generator, magnetic core, amorphous iron.

Электротехника, 2018, №1, ст р. 21-25

Характеристики плазменного выброса стреляющих полупроводниковых свечей зажигания газотурбинных двигателей

ГИЗАТУЛЛИН Ф.А., АЛИМБЕКОВ Р.Л., САЛИХОВ Р.М.

Известно много разновидностей стреляющих полупроводниковых свечей для емкостных систем зажигания газотурбинных двигателей, различающихся конструкцией разрядных камер. Отличительной особенностью серийных стреляющих свечей, выпускаемых отечественной промышленностью, является взаимное расположение полупроводникового элемента и бокового электрода, при котором рабочая поверхность полупроводника расположена не по оси свечи, а под некоторым углом, а рабочая поверхность бокового электрода находится близко к основанию разрядной камеры. При этом систематизированные сведения об исследовании разрядных процессов в стреляющих свечах в литературе отсутствуют. Статья посвящена исследованию взаимосвязи

энергетических параметров искровых разрядов, пространственно-временных характеристик плазменного выброса из разрядных камер свечей и воспламеняющей способности свечей. В качестве методов исследований разрядных процессов приняты осциллографирование совместно с высокоскоростным фотографированием плазменного выброса. Объектом исследований являлась серийная полупроводниковая свеча и макет стреляющей свечи с «окном» из органического стекла, позволяющий фотографировать процесс развития плазмы разряда внутри разрядной камеры. Осциллограммы разрядного тока и падения напряжения в свечах регистрировались двухлучевым осциллографом с помощью безындуктивного коаксиального шунта и омического делителя напряжения. Параметры плазменного выброса соотнесены с воспламеняющей способностью свечей. Полученные результаты дополняют общие представления о закономерностях развития плазменного выброса из разрядных камер полупроводниковых свечей и подтверждают теорию влияния параметров разряда на начальную скорость процесса воспламенения с позиций теплового и цепного механизмов воспламенения.

Ключевые слова: газотурбинные двигатели, полупроводниковые свечи зажигания, пространственно-временные характеристики плазменного выброса.

A large number of varieties of shooting semiconductor plugs for capacitive ignition systems of gas turbine engines are known with differ design of discharge chambers. The main characteristic feature of the serial shooting plugs produced by the domestic industry is the mutual arrangement of the semiconductor element and the side electrode, in which the working surface of the semiconductor is located not at the plug axis but at some angle. The working surface of the side electrode is close to the base of the discharge chamber. And there is no systematic information on the research of discharge processes in shooting plugs in the known scientific and technical literature. The article solves the problem of investigating the interrelation between the energy parameters of spark discharges, the space-time characteristics of plasma ejection from discharge chambers of plugs and the igniting plug ability. From known research methods of discharge processes, the oscillography method together with the plasma ejection high-speed photographing method is determined. The research object was a serial semiconductor plug and a specially developed layout of a shooting plug with a "window" made of organic glass, allowing photographing the plasma discharge development process within a discharge chamber. The oscillogram recording of the discharge current and the voltage drop in the plugs was carried out using a two-beam oscillograph with the help of a non-inductive coaxial shunt and an ohmic voltage divider. The parameters of the plasma ejection are correlated with the plug flammability.

The obtained results complement the knowledge about the patterns of development of plasma emission from the discharge chambers of the semiconductor plugs, and confirm the theory of the influence of discharge parameters on the initial velocity of the ignition process from the standpoint of thermal and chain mechanisms of ignition.

Key words: gas turbine engines, semiconductor plug, spatial-temporal characteristics of the plasma emission.

Электротехника, 2018, №1, ст р. 25-29

Выбор оптимальных размеров высокотемпературного стартер-генератора летательного аппарата

ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ИСМАГИЛОВ Ш.Г., ТАРАСОВ Н.Г., АЙГУЗИНА В.В.

Основной тенденцией при разработке новых летательных аппаратов является концепция создания более электрического самолета. При реализации этой концепции ставится задача прямой интеграции электрической машины с валом низкого и/или высокого давления авиационного двигателя. В результате возможны снижение массогабаритных показателей двигателя, экономия топлива, повышение надежности, а также снижение затрат на обслуживание летательного аппарата. Для реализации концепции необходима разработка высокоэффективного высокотемпературного стартер-генератора, способного работать в агрессивных температурных условиях окружающей среды при минимальных технологических возможностях охлаждения. В статье представлена конструкция стартер-генератора с внешним ротором для интеграции с валом высокого давления авиационного двигателя. Для получения лучших параметров и характеристик предлагаемой конструкции проведена многокритериальная оптимизация с использованием программного комплекса *AnsysMaxwell*. Оптимальные размеры стартер-генератора с внешним ротором определены с помощью генетических алгоритмов. Полученный в результате оптимизации стартер-генератор обладает минимальными массогабаритными показателями, минимальными потерями, высокими энергетическими характеристиками. Для оценки работоспособности стартер-генератора проведено компьютерное моделирование, на основе которого разработан маломощный экспериментальный макет. Эксперименты выполнены в режиме холостого хода и при нагрузке. По результатам экспериментов подтверждены работоспособность стартер-генератора, его эффективность для интеграции с валом высокого давления, правильность выбора конструкции.

Ключевые слова: летательный аппарат, высокотемпературный стартер-генератор, вал высокого давления, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм.

The main trend in the new aircraft development is the more electric aircraft concept. The main challenge in the implementation of this concept is the direct integration of the electric machine into the low and / or high-pressure shaft of the aircraft engine. As a result, it is possible to reduce the weight and dimensions of the aircraft engine, save fuel, increase reliability, and reduce the maintaining cost of the aircraft. To implement the concept of more electric aircraft, it is necessary to develop a new high-efficiency high-temperature starter-generator for operation in the aggressive ambient temperature conditions with minimal technological cooling capabilities. The paper presents the design of a starter-generator with an external rotor for the integration into the high-pressure shaft of the aircraft engine. To obtain the best parameters and characteristics of the proposed design, multicriteria optimization was carried out by using the Ansys Maxwell software package. The optimum sizes of the starter-generator with an external rotor are determined by using genetic algorithms. The resulting starter-generator has minimal mass-and-size parameters, minimal losses, and high-energy characteristics. To assess the performance of an optimized starter-generator, computer simulations were performed, based on which a low-power experimental model was developed. Experimental studies were performed at no-load and load modes with two temperature regimes: at 25 °C and 217 °C for 5 minutes and 217 °C for 1 hour. The experimental research results were confirmed the efficiency of the proposed starter-generator, the correct design selection and its efficiency for integration into the high-pressure shaft. The obtained results can be used to create a full-sized starter-generator integrated into the high-pressure shaft of an aircraft engine of a more electric aircraft.

Key words: aircraft, high-temperature starter-generator, high-pressure shaft, multicriteria optimization, genetic algorithm.

Электротехника, 2018, №1, ст р. 30-30

Влияние концентрации частиц сажи на напряженность в воздушном зазоре электрофильтра

ХАЙРУЛЛИН И.Х., ОХОТНИКОВ М.В., ВОЛКОВА Т.А., МАКСУДОВ Д.В.,
НУСЕНКИС А.А., САЙГАФАРОВ Д.У.

Рассмотрены параметры электростатического фильтра, включающие в себя уровень

напряженности электростатического поля и величину пробивного напряжения, проанализирована эффективность их влияния на процесс улавливания частиц сажи. Произведено компьютерное моделирование электростатического поля между плоскими параллельными электродами, имеющими разные потенциалы. Рассмотрено изменение картины полученного поля при попадании в него частиц электропроводящей сажи. С помощью программного комплекса *Ansys* исследована картина изменения напряженности между данными электродами в зависимости от концентрации находящихся между ними частиц. Предложена компьютерная модель, имитирующая ситуацию создания максимального уровня напряженности электрического поля в симметричном электростатическом поле при фиксированном воздушном зазоре. Оценено снижение уровня напряжения, подаваемого на данные электроды, при размещении между ними элементов, имитирующих частицы дизельной сажи со средними размерами, упоминаемыми в литературе. По результатам моделирования определено, что наличие частиц электропроводящей сажи значительно влияют на картину электростатического поля, благодаря чему происходит локальное изменение картины напряженности результирующего поля. Установлено, что для поддержания уровня максимальной напряженности электростатического поля при наличии электропроводящих частиц между электродами необходимо снижение подаваемого на данные электроды напряжения. Для подтверждения полученных данных проведены экспериментальные исследования по определению пробивного напряжения между электродами образующими симметричное электростатическое поле. По полученным данным установлено значительное снижение уровня пробивного напряжения в случае пропускания между электродами дыма образуемого при сжигании дизельного топлива в отличие от варианта замера пробивного напряжения воздуха без частиц сажи.

Ключевые слова: электростатический фильтр, напряженность электрического поля, пробивное напряжение.

The parameters of the electrostatic filter, including the level of the electrostatic field intensity and the breakdown voltage, are analyzed in the article, the effectiveness of their influence on the process of trapping soot particles contained in the smoke is analyzed. A computer simulation of the electrostatic field between plane parallel electrodes having different potentials is made. The change in the picture of the obtained field is observed when particles of electrically conductive soot enter it. With the help of the software complex *Ansys*, the picture of the change in the tension between these electrodes was studied depending on the concentration of the particles between them. A computer model simulating the situation of creating the

maximum level of electric field strength in a symmetric electrostatic field with a fixed air gap is proposed. It is estimated that the level of voltage supplied to these electrodes is reduced by placing elements of the simulating diesel particle with medium sizes mentioned in the literature between them. According to the simulation results, it is determined that the presence of particles of electroconductive soot significantly affect the picture of the electrostatic field, due to which a local change in the intensity field of the resulting field occurs. It is established that in order to maintain the maximum electrostatic field strength in the presence of electrically conductive particles between the electrodes, a reduction in the voltage applied to these electrodes is necessary. To confirm the data obtained, experimental studies have been carried out to determine the breakdown voltage between the electrodes forming a symmetrical electrostatic field. According to the data obtained, a significant decrease in the level of the breakdown voltage is established in the case of the transmission of diesel fuel formed between the smoke electrodes in contrast to the measurement of the breakdown voltage of air without particles of soot.

Key words: electrostatic filter, electric field strength, breakdown voltage.

Электротехника, 2018, №1, ст р. 31-32

Авторы опубликованных статей

Электротехника, 2018, №1, ст р. 33-38

Адаптивное определение места повреждения на линии электропередачи с регистрацией импульса в волновом высокочастотном тракте

КУЛИКОВ А.Л., АНАНЬЕВ В.В.

Разработан адаптивный метод повышения точности волнового определения места повреждения для линий электропередачи. Предложенный метод позволяет компенсировать ошибку двухстороннего метода, обусловленную диспергирующим характером провода фазы, по которой происходит распространение высокочастотного электромагнитного импульса от точки повреждения. Выполнена оценка погрешности определения расстояния до повреждения в зависимости от способа получения высокочастотного сигнала. Даны рекомендации по подключению средств регистрации электромагнитных импульсов, используемых для устройств волнового определения места повреждения. Предложенный метод позволяет существенно снизить ошибки оценки

расстояния до повреждения, подвержен меньшему влиянию внешних факторов на точность оценки. Разработанный метод может быть внедрен как в существующие, так и в перспективные устройства волнового определения места повреждения.

Ключевые слова: линия электропередачи, волновой метод определения места повреждения, скорость распространения электромагнитных волн, волновой тракт.

An improved accurate adaptive travelling wave fault location method is developed. The method can compensate error caused by travelling wave propagation through dispersive phase wires. Some high-frequency signal preprocessing methods leads to large fault location errors. In the article this method errors are compared. Travelling wave fault location high-frequency recorder connecting recommendations are given. An improved method allows reducing the errors in distance estimation to the damage, improved method accuracy is less influenced by external factors. The developed method can be embedded into existing and future travelling wave method based fault location devices.

Keywords: power transmission lines, travelling wave fault location, travelling wave speed, modal components.

Электротехника, 2018, №1, ст р. 39-43

Повышение эффективности обмоток машин переменного тока

НОСКОВ В.А., ПАНТЕЛЕЕВА Л.А., МАРТЫНОВ К.В.

Свойства магнитного поля, создаваемого током трёхфазной обмотки статора асинхронного двигателя, во многом зависят от вида этой обмотки. Чем меньше высших ("паразитных") гармоник по отношению к основной (рабочей) гармонике содержится в кривой МДС, тем эффективней обмотка. Широкое распространение получили трёхфазные 6-зонные обмотки. Увеличение числа фаз способствует уменьшению содержания высших гармоник, но требует специального шестифазного источника питания. Рассматривается трёхфазная совмещённая 12-зонная обмотка, электромагнитные свойства которой приближаются к свойствам шестифазной обмотки. Такая обмотка сравнивается со стандартной 6-зонной обмоткой по коэффициенту дифференциального рассеяния, который характеризует магнитное поле по содержанию в нём высших гармоник. Проведено сравнение двух вариантов: со сплошными и несплошными фазными зонами. Приведены результаты расчётов коэффициентов дифференциального рассеяния обмоток

для 24, 36 и 48 пазов, приходящихся на пару полюсов. Для совмещённой обмотки со сплошными фазными зонами выполнен расчёт наименьшего теоретически возможного коэффициента дифференциального рассеяния. Доказана большая эффективность совмещённой обмотки со сплошными фазными зонами по сравнению со стандартной обмоткой и совмещённой обмоткой с несплошными фазными зонами.

Ключевые слова: машина переменного тока, асинхронные двигатели, высшие гармоники, совмещённая обмотка, коэффициент дифференциального рассеяния, диаграмма Гёргеса.

Properties of magnetic field, created by current of a three-phase winding of the starter of induction motor greatly depend on type of winding. The less upper («parasitic») harmonics towards the major working harmonic in the curve of magneto motive force are the more effective winding is. Three-phase 6-zoned windings have become widely spread. The increasing of phase number promotes the decreasing of upper harmonics, but special six-phase source of supply is needed to achieve it. Three-phase combined 12-zoned winding is under review, it`s electromagnetic properties are closer to the six-phase`s ones. Such winding is compared to a standard 6-zoned one by coefficient of differential scattering, that characterizes magnetic field concerning content of upper harmonics in it. Windings are compared by two options: with continuous and non-continuous phase zones. Calculation data of differential scattering coefficients of windings for 24, 36 and 48 slots are given, concerning a pair of poles. Calculation of the smallest theoretically possible coefficient of differential scattering is performed for a combined winding with continuous phase zones. High efficiency of combined winding with continuous phase zones in comparison with standard winding and combined winding with non-continuous phase zones is proved.

Key words: AC machines, induction motor, higher harmonics, combined winding, differential scattering coefficient, Gerges' diagram.

Электротехника, 2018, №1, стр. 43-49

О применении электромеханических систем для ограничения динамических нагрузок упругих механизмов

ПЯТИБРАТОВ Г.Я.

Рассмотрены активные способы демпфирования колебаний и ограничения динамических нагрузок в упругих элементах механизмов, которые реализуются благодаря созданию

электроприводом дополнительных силовых воздействий, обеспечивающих уменьшение максимальных усилий в упругих передачах рабочих машин. Выявлены основные параметры и энергетические характеристики электромеханических систем, влияющие на эффективность применения активных способов ограничения электроприводом динамических нагрузок в упругих элементах механических передач. Показано, что максимальное значение тока электродвигателя и скорость его изменения могут уменьшить эффективность активного способа ограничения электроприводом динамических нагрузок механизмов и затруднить его практическую реализацию. Получены аналитические выражения для определения минимаксных значений момента (тока) двигателя и ЭДС питающего его преобразователя, необходимых для заданного уменьшения динамических усилий в упругих элементах механизмов. Определено влияние параметров механической части и электропривода на эффективность уменьшения динамических нагрузок в упругих механических передачах. Выполнены исследования по определению эффективности и области целесообразного применения активных способов ограничения динамических нагрузок в упругих передачах механизмов с использованием современных электроприводов. Результаты исследований применены при внедрении активных способов ограничения электроприводом динамических нагрузок в упругих передачах механизма напора карьерного экскаватора типа ЭКГ-4,6Б, копающих механизмов экскаваторов ЭКГ-20, для уменьшения колебаний скорости и усилий исполнительных органов сбалансированных манипуляторов типа МП-100 и систем обезвешивания скафандров тренажёрных комплексов, обеспечивающих подготовку космонавтов к работе в условиях невесомости.

Ключевые слова: электропривод, упругая передача, динамические нагрузки, активное демпфирование колебаний механизмов.

Active ways of oscillations damping and dynamic loads limitation of machinery springy elements were studied that are implemented by additional force impacts made by the electric drive providing reduction of maximum efforts in springy gears of operating machinery. The main parameters and energy performances of electromechanical systems were detected that have impact on application efficiency of active ways of dynamic loads limitations made by the electric drive in springy elements of mechanical gears. It was approved that arising maximum values of the electric engine current and speed of its change can slow implementation and decrease the limitation efficiency of machinery dynamic loads by the electric drive. Analytic equations to calculate minimax values of engine torque (current) and EMF of supplied converter were

performed that are required for determined decrease of dynamic efforts in machinery springy elements. Impact of hardware and electric drive parameters on decrease efficiency of dynamic loads in springy mechanical gears was specified. Investigation for determination of efficiency and area of appropriate application of active ways of dynamic loads limitations in machinery springy gears using modern electric drives were carried out. The results of investigation were applied while implementing active ways of dynamic loads limitations made by electric drive in springy gears of mine excavator thrust mechanism EKG-4,6B, dig mechanism of EKG-20 excavator, speed and efforts oscillations of operating parts of MP-100 balanced manipulator and amours weight deprived systems of simulators complexes that provide cosmonauts training in zero-gravity conditions.

Key words: electric drive, resilient gear, dynamic loads, active damping of machinery oscillations.

Электротехника, 2018, №1, стр. 49-54

Источники питания для электронных высоковольтных измерительных трансформаторов тока

ВОЛОВИЧ Г.И.

Рассматривается источник питания для электронных высоковольтных измерительных трансформаторов тока с отбором энергии от измеряемого тока, протекающего по высоковольтной линии. Для этого на линии монтируется магнитопровод трансформатора питания, с обмотки которого отбирается необходимая мощность. В условиях изменения тока линии в широких пределах трансформатор питания должен иметь быстронасыщающийся магнитопровод. Показано, что для уменьшения потерь и снижения нагрузки элементов схемы источника питания в условиях широкого диапазона изменения измеряемого тока, в цепь вторичной обмотки трансформатора питания следует включать балластную нагрузку. Проведено сравнение трех вариантов балластной нагрузки: резистивной, емкостной и в виде транзисторного ограничителя тока. Приведены результаты моделирования в пакете VisSim всех рассматриваемых вариантов балластной нагрузки, а также при включении источника питания без балластной нагрузки. Моделирование проведено для наименьшего и наибольшего измеряемых токов, а также для режима короткого замыкания в линии. Результаты моделирования показали предпочтительность варианта источника питания на насыщающемся трансформаторе с транзисторным ограничителем тока. Представлен вариант схемы транзисторного

ограничителя тока.

Ключевые слова: источники питания, электронные трансформаторы тока, измерения в высоковольтных электрических сетях.

The paper describes a building of power source for electronic high voltage measuring current transformers extracting energy from measuring current by transformer with magnetic core saturation. For this purpose, a supply transformer magnetic core installed on the line, windings of which give the necessary power. In the conditions of current change in the line within wide limits, the power transformer must have a easily sated magnetic core. We demonstrated that the power transformer should contain a ballast load at secondary winding circuit to decrease losses and reduce the loading of circuit components when measuring current varies in a wide range. We compared three variants of ballast load: resistive, capacitive and in the form of a transistor current limiter. Presented the results of simulating of all variants of ballast load as well as using power source without ballast load, in VisSim software package. The simulation is performed for the smallest and largest measured currents, as well as for the short-circuit mode in the line. The simulation results show the advantage of the power supply on the transistor current limiter. A variant of the circuit of on the transistor current limiter presented.

Key words: power source, electronic current transformer, high-voltage measurements in electrical network.

Электротехника, 2018, №1, ст р. 55-61

Анализ и расчет параллельного активного фильтра

ГЕРМАН-ГАЛКИН С.Г.

Выполнен анализ электромагнитных процессов в трехфазной несимметричной сети с параллельным активным фильтром и предложена методика расчета его параметров. Основой анализа служит преобразование несимметричных токов в нагрузку от пространственного представления к плоскостному, где возможно описание электромагнитных процессов методами теории цепей. В результате анализа получены аналитические соотношения между переменными состояния фильтра и его параметрами. Рассчитаны и построены основные зависимости, на основании которых предложена методика расчета параметров активного фильтра. Несимметричная трехфазная сеть с активным фильтром, рассчитанная по предложенной методике, реализована в среде

Simulink-Sim Power System. Результаты модельного исследования подтвердили справедливость теоретического анализа и способность активного фильтра компенсировать все неактивные составляющие мощности в несимметричной трехфазной сети.

Ключевые слова: трехфазная асимметричная сеть, параллельный активный фильтр, электромагнитные процессы, методика расчета параметров, среда Simulink-Sim Power System.

In this article presented the analysis of electromagnetic processes in a three-phase asymmetric network with parallel active filter and proposed method calculation of its parameters. The basis of analysis is transformation of asymmetrical currents in the load from the spatial representation to flatness of representation, where possible description of electromagnetic processes proven methods of circuit theory. As a result of the analysis obtained analytical relations between the state variables and parameters of the filter. Designed and built basic characteristics and proposed methodology for calculating of the parameters active filter. The asymmetric three-phase network with the active filter implemented in environment Simulink-Sim Power System. The results of modeling study confirmed the results of the theoretical analysis and the ability of the active filter to compensate all inactive components of power in an asymmetric three-phase network.

Key words: three-phase asymmetric network, parallel active filter, analysis of electromagnetic processes, method calculation of parameters, environment Simulink-Sim Power System.

Электротехника, 2018, №1, стр. 62-72

Максимальные токовые защиты от замыканий на землю на основе высших гармоник для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ

ШУИИ В.А., МАРТЫНОВ В.А., ШАГУРИНА Е.С., ШАДРИКОВА Т.Ю.

В компенсированных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения в качестве защиты от замыканий на землю наиболее широкое применение получили устройства, основанные на способе абсолютного замера уровня высших гармоник в токах нулевой последовательности присоединений защищаемого объекта. Однако многолетний опыт эксплуатации показал не всегда достаточное техническое совершенство (селективность и чувствительность) максимальных токовых защит от замыканий на землю, основанных на использовании способа абсолютного замера высших гармоник. Одной из причин низкого технического совершенства указанных

устройств защиты являются погрешности в оценке максимально и минимально возможных уровней высших гармоник в токе замыкания на землю компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, необходимых для выбора уставок по току срабатывания и оценки чувствительности. На основе вычислительных экспериментов на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ выявлены основные факторы, влияющие на максимальный и минимальный уровни высших гармоник в токе замыкания на землю и их отношение, получены предельные значения указанных уровней, дана оценка степени нестабильности уровня гармоник в токе замыкания для кабельных сетей с различным составом комплексной нагрузки, установлена ее взаимосвязь с колебаниями суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на шинах 6–10 кВ центров питания сетей. С учетом указанных оценок определены условия и область применения максимальных токовых защит от данного вида повреждений, основанных на использовании высших гармоник тока нулевой последовательности, для различных объектов компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ и предложены уточнения методики выбора их уставок по току срабатывания.

Ключевые слова: кабельные сети 6–10 кВ, компенсация емкостных токов, однофазные замыкания на землю, высшие гармоники, максимальная токовая защита от замыканий на землю на основе высших гармоник, условия и область применения.

Devices based on the method of absolute measurement of the higher harmonics level in the zero sequence currents of connections of protected object have received the widest application as protection against earth faults in compensated cable networks of 6–10 kV voltage systems of industrial and urban power supply. However, many years of operation experience has shown not always sufficient technical perfection (selectivity and sensitivity) of the overcurrent protection against earth faults based on the method of absolute measurement of higher harmonics. One of the reasons for the low technical perfection of these protection devices is the inaccuracy in estimating of the maximum and minimum possible higher harmonics levels in the earth fault current of 6–10 kV compensated cable networks required to select the settings for the pickup current and sensitivity evaluation. The main factors influencing the maximum and minimum higher harmonics levels in the earth fault current and their ratio are revealed on the basis of computational experiments on imitation models of 6-10 kV cable networks, the limiting values of these levels are obtained, the estimation of the harmonics level instability in the fault current for cable networks with different complex load composition is given, its interrelation with fluctuations of the total harmonic voltage components on buses 6–10 kV of networks power

centers is established. Conditions and application area of overcurrent protections against this type of damages based on the use of higher harmonics of the zero-sequence current for various objects of 6–10 kV compensated cable networks are determined taking into account the above estimates. Also specification of the method of selecting of this protection settings for the operating current is proposed.

Key words: 6–10 kV cable networks, compensation of the capacitive currents, single-phase earth faults, higher harmonics, overcurrent protections against earth faults based on higher harmonics, current protections sensitivity, conditions and application area.

Электротехника, 2018, №1, ст р. 73-80

Об особенностях процессов зарядки-разрядки суперконденсаторов

АМБРОЗЕВИЧ А.С., АМБРОЗЕВИЧ С.А., СИБАТОВ Р.Т., УЧАЙКИН В.В.

Приведены результаты исследований суперконденсаторов фирмы Panasonic с помощью нескольких экспериментальных методик – измерения зависимостей токов заряда и разряда от времени, циклического заряда постоянным током и циклической вольтамперометрии. Определены значения внутреннего сопротивления, статической и динамической емкости, а также их зависимости от приложенного к конденсатору напряжения. Измерения показали, что начальная стадия релаксации тока разряда хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью от времени, а далее наблюдается переход к степенной зависимости. Этот известный эффект находит объяснение на основе учёта особых свойств процессов переноса в пористой среде фрактального типа, адекватно отражаемых дробно-дифференциальной моделью аномальной диффузии. Слабая чувствительность формы кривых релаксации к величине малого напряжения (<3 В) и изменение степенного показателя при повышенных напряжениях (>3 В) объясняется возникновением новых перколяционных путей, заблокированных при малых напряжениях заряда наличием высоких потенциальных барьеров. По измерениям напряжения при циклическом заряде постоянным током были определены внутреннее сопротивление и статическая емкость суперконденсатора. Показано, что эти характеристики зависят от приложенного к конденсатору напряжения. С помощью циклической вольтамперометрии установлена зависимость динамической емкости от напряжения и показано, что емкость зависит не только от напряжения, но и от предыстории заряда и разряда конденсатора. Сравнение результатов экспериментов с данными по имеющимся в литературе моделям и схемам замещения с пассивными элементами R , C и L позволяет сделать вывод, что такие схемы

могут быть применены для объяснения лишь ограниченного круга явлений, в частности, поведения при малых временах релаксации.

Ключевые слова: суперконденсаторы, релаксация, вольтамперные характеристики.

We present the results of experimental investigation of Panasonic supercapacitors. For this purpose we have conducted a series of experiments, namely, measurements of charging and discharging versus time, constant current charging, and cyclic voltammetry. Intrinsic resistance, static and dynamic capacitance was measured alongside with the dependencies of these characteristics on the voltage applied to the capacitor. The measurements revealed that exponential behaviour observed for the initial stage of the discharge curve changes to power law relaxation at large time scales. This well-known effect is explained with taking specific properties of the transfer process in fractal-type porous medium into account. These processes are adequately described by the fractional differential model of anomalous diffusion. Strong variation of the power law factor at relatively large applied voltages ($> 3V$) in contrast to the weak dependence of the factor at voltages below 3V implies appearance of new percolation paths that were initially blocked at low voltages due to high potential barriers. The values of intrinsic resistance and static capacitance were determined by measuring the voltage at supercapacitor during its charging with constant current. It was demonstrated that these characteristics depend on the applied voltage. The dependence of the dynamic capacitance on the voltage was obtained from the cyclic voltammetry experiment. The dynamic capacitance was shown to depend not only on the voltage but on the charging and discharging history. Comparison between the experimental results and the published data on models and equivalent circuits incorporating passive R, L and C elements allows us to conclude that such models and equivalent circuits relevantly describe just the exponential interval of the charge relaxation in a supercapacitor.

Key words: supercapacitors, decays, volt-current characteristics.

Электротехника, 2018, №1, ст р. 81-81

Михаил Григорьевич Юньков (Некролог)