

*Электричество, 2016, №2, с. 4–11.*

### **Использование электродных систем с поверхностным диэлектрическим барьерным разрядом в качестве эмиттеров тока**

ЛАЗУКИН А.В., КРИВОВ С.А.

Представлены результаты экспериментальных исследований токовых характеристик объемно-поверхностного разряда в электродных системах с дополнительными электродами. Установлено, что ток на высоковольтный коллектор в рассматриваемых условиях слабо зависит от влажности атмосферного воздуха (в пределах от 15 до 55%) и диэлектрической проницаемости барьера (от 2 до 16, толщина диэлектрического барьера 1 мм). Приведены результаты исследования токовых характеристик плазменного листа в трехэлектродной и четырехэлектродной системах. Показано, что плазменный лист может служить эффективным источником объемного заряда в случае расположения над ним дополнительного электрода, находящегося под положительным постоянным напряжением. Предложен ряд рекомендаций по организации электродных систем с поверхностным разрядом, используемых в качестве эмиттеров тока.

*Ключевые слова:* поверхностный разряд, ионный ток, диэлектрический барьер, многоэлектродная система, плазменный лист

Experimental results of investigation of current characteristics of volume-surface discharge in electrode systems with an additional electrodes are presented. It is found experimentally that there is weak dependence of the current to the high voltage collector on the humidity of the atmospheric air ( in the range from 15 % to 55 %) and on the dielectric constant of the barrier (in the range from 2 to 16, thinkness 1 mm). Results of investigation of current characteristics of plasma sheet formed in the three and four electrodes systems are given. The experimental show that plasma sheet may be an effective source of volume charge in case of an additional electrode with positive potential placed about the plasma sheet. Arrange of recommendations are given to organized the electrode systems with surface discharge used as a current emmitter.

*Key words:* surface discharge, ionic current, dielectric barrier, multielectrode system, plasma sheet

*Электричество, 2016, №2, с. 11–18.*

### **Оценка влияния метеоусловий на годовые нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий**

ШВЕДОВ Г.В., АЗАРОВ А.Н.

Проанализирована необходимость учета фактических изменяющихся метеорологических факторов при расчете нагрузочных потерь электроэнергии в проводах воздушных линий электропередачи за календарный год. Проанализирована возможность принятия температуры провода равной фактической или усредненной за расчетный период температуре воздуха. Представлена методика и результаты исследований влияния способов учета температуры провода на погрешность расчета годовых нагрузочных потерь электроэнергии в воздушной линии, расположенной в московском регионе и

выполненной проводами марки АС 240/32, методами оперативных расчетов и средних нагрузок. На основе анализа полученных результатов рекомендуется принимать температуру провода равной либо среднегодовой температуре воздуха, если расчет проводится методом оперативных расчетов, либо среднемесячной температуре воздуха, если – методом средних нагрузок.

*Ключевые слова:* воздушная линия электропередачи, потери электроэнергии, активные сопротивления, температура провода, метеорологические условия

The need to consider the actual varying meteorological factors in calculating the load losses of electric energy in the wires of overhead power lines for a calendar year is analyzed. The possibility to take the wire temperature equal to the actual air temperature or to its value averaged over the calculated period is analyzed. A study procedure is presented together with the results from investigating the effect of methods used for taking into account the wire temperature on the accuracy of calculating the annual load losses of electric energy in an overhead power line located in the Moscow region and made using type AS 240/32 wires obtained by applying the methods of operating calculations and average loads. Based on an analysis of the obtained results, it is recommended to take the wire temperature equal to either the annual average air temperature if the calculation is carried out using the method of operating calculations or to the monthly average air temperature if the calculation is carried out using the method of average loads.

*Key words:* overhead power line, electric energy losses, resistances, wire temperature, meteorological conditions

*Электричество, 2016, № 2, с. 19–28.*

#### **Расчетная модель для оценки характеристик электромагнитных трансформаторов тока** МИРОНЮК Н.Е., СОБОЛЕВ А.С., ПУДОВ В.И.

Разработана и апробирована нелинейная расчетная модель для оценки точностных характеристик (основных и дополнительных погрешностей), электромагнитных трансформаторов тока с учетом условий их эксплуатации, характеризующихся несинусоидальностью измеряемого тока и остаточной намагниченностью нелинейного элемента – ферромагнитного магнитопровода. Эффективное функционирование расчетной модели основано на использовании экспериментальных динамических петель гистерезиса материала магнитопровода трансформаторов тока, к которым приближают расчетные аналоги петель путем вариации основных параметров, влияющих на точностные характеристики трансформаторов тока. Применение расчетной модели позволяет учитывать условия эксплуатации трансформаторов тока при оценке их фактических точностных характеристик, которые могут отличаться от нормированных характеристик для данного класса точности трансформаторов тока. На основе предлагаемой нелинейной расчётной модели могут быть разработаны общий метод и методика для оценки точностных характеристик конструируемых трансформаторов тока с учётом их параметров и условий эксплуатации, что позволит оптимизировать параметры и существенно повысить эффективность применения трансформаторов тока.

*Ключевые слова:* трансформаторы тока, расчетная модель, точностные характеристики, класс точности, несинусоидальность измеряемого тока

The nonlinear model for estimation of errors (the basic and additional errors), electromagnetic transformers of the electric current taking into consideration conditions of their use, is developed and approved. Conditions are characterised nonsinusoidal an electric current and residual magnetisation of a nonlinear element ferromagnetic magnetic conductor. For ferromagnetic magnetic conductor effective functioning of model is based on use of experimental dynamic loops of a hysteresis. Model allows to consider conditions of uses of transformers of a current at their estimation actual accuracy characteristics which can differ from norm of characteristics for the given class of accuracy of transformers of a current. On the basis of offered nonlinear model the general method and a technique can be developed for an estimation of the metrological characteristics of designed transformers of a current. Parametres of transformer of a current and use condition are considered. It will allow to optimize parametres of transformers of an electric current to improve efficiency.

*Key words:* current transformers, calculation model, accuracy characteristic, accuracy class, nonsinusoidal electric current

*Электричество, 2016, №2, с.28–38.*

### **Электромагнитное влияние высоковольтных линий электропередачи**

КОЛЕЧИЦКИЙ Е.С., КОРОЛЕВ И.В.

Излагается систематический подход к рассмотрению всех аспектов расчета наведенных напряжений. Проанализирована возможность появления наведенных токов и напряжений на различных инженерных сооружениях, расположенных вблизи ВЛ. На примере физической модели рассматриваются два характерных случая: провода двух ВЛ одного класса напряжения подвешены на двухцепной опоре или две ВЛ проходят на некотором расстоянии друг от друга. Предложенная инженерная методика позволяет рассчитывать наведенные продольные и емкостные токи при любых способах заземления ремонтируемой ВЛ, как при заземлении по ее концам или при заземлении РВЛ только лишь в одной точке РВЛ (или на двух соседних опорах). Методика включает в себя как отдельный элемент расчеты емкостных токов и соответствующих наведенных напряжений. Показана возможность появления наведенных токов и напряжений на различных инженерных сооружениях, расположенных вблизи ВЛ. Разработанная методика проиллюстрирована на характерных примерах в виде программ в среде Mathcad. Показано, что для ВЛ с вертикальным расположением фазных проводов целесообразно заземление всех проводов в одной точке, а для ВЛ с горизонтальным расположением проводов – каждого провода отдельно. На основании анализа результатов показано, что совпадения для продольных параметров ВЛ и индуцированных продольных токов для ВЛ с горизонтальным расположением проводов лежит в рамках инженерной точности.

*Ключевые слова:* линии электропередачи, наведенные напряжения, токи, метод расчета

A systematic approach to considering all aspects relating to calculation of induced voltages is outlined. The possibility of induced voltages to occur on various engineering structures located near an overhead power line (OPL) is analyzed. Two typical cases are considered taking a physical model as an example: the wires of two OPLs of the same voltage rating are suspended on a two circuit tower, or two OPLs running at some distance from each other. By using the proposed engineering procedure it is possible to calculate the induced longitudinal and capacitive currents with any grounding arrangements of an OPL taken out for repair: either with grounding it at both ends or at only one point (or at two neighboring towers). The procedure includes, as a separate element, calculations of capacitive currents and the corresponding induced voltages. The possibility of induced currents and voltages to occur on various engineering structures located near an OPL is shown. The use of the developed procedure is illustrated on typical examples in the form of computer programs in the MathCAD environment. It is shown that for an OPL with vertically arranged wires it is advisable to ground all its wires at one point, whereas in the case of an OPL with horizontally arranged wires, each of its conductors should be grounded individually. It is shown based on an analysis of the results that the predictions obtained for the longitudinal parameters of OPLs and for the induced longitudinal currents in OPLs with horizontally arranged wires coincide within the engineering accuracy limits.

*Key words:* power lines, induced voltages, currents, calculation method

*Электричество, 2016, №2, с.39–44.*

### **Особенности проектирования трансформаторов с вращающимся магнитным полем для полупроводниковых преобразователей**

КУЗЬМИН И.Ю., ЧЕРЕВКО А.И., ЛИМОННИКОВА Е.В.

Закладываются основы методики расчета магнитной цепи трансформатора с вращающимся магнитным полем (ТВМП). Расчет проводится с использованием специального программного обеспечения, реализующего метод конечных элементов при моделировании магнитного поля ТВМП. Показано, что опыт проектирования трансформаторов стержневой конструкции и электрических машин малопригоден для расчета и проектирования ТВМП. Установлен порядок действий для получения карты магнитной индукции – важного критерия при определении правильности проектирования ТВМП. Дается определение кривой магнитного поля и объясняется значимость ее анализа для обеспечения первичных и вторичных значений напряжения ТВМП с минимальным набором высших гармоник. Показан порядок построения основной кривой намагничивания ТВМП и даны рекомендации по расположению на данной кривой точки холостого хода. Результат применения предлагаемой методики показан на примере проектирования ТВМП для управляемого выпрямителя мощностью 4 кВт.

*Ключевые слова:* полупроводниковый преобразователь, трансформатор с вращающимся магнитным полем, метод конечных элементов, специализированное программное обеспечение, кривая магнитного поля, магнитная индукция, характеристика холостого хода

The principles of a procedure for calculating the magnetic circuit of a transformer with rotating magnetic field (RMFT) are elaborated. The calculation is carried out using dedicated software implementing the finite element method in modeling the RMFT magnetic field. It is shown that the experience gained from designing core type transformers and electrical machines is of little use for calculating and designing RMFTs. A sequence of steps to be done for obtaining the magnetic induction map—an important criterion in determining the correctness of RMFT designing—has been established. The definition of a magnetic field curve is given, and the significance of its analysis for obtaining the RMFT primary and secondary voltages with the minimal set of higher harmonic components is explained. The sequence of steps for plotting the RMFT fundamental magnetization curve is presented, and recommendations for placing the no-load point on this curve are given. The result of applying the proposed procedure is illustrated on the example of designing the RMFT for a 4kW controlled rectifier.

*Key words:* semiconductor rectifier, transformer with rotating magnetic field, finite element method, dedicated software, magnetic field curve, no-load characteristic

*Электричество, 2016, №2, с.44–51.*

#### **Процессы деградации электроизоляционных конструкций авионики**

ВАСИЛЬЕВ Ф.В., МЕДВЕДЕВ А.М.

Особенностями работы электроизоляционных конструкций авионики являются экстремальные условия эксплуатации, а также миниатюрность элементов изоляции, не позволяющая создавать достаточный запас прочности. Вместе с тем низкий уровень рабочих напряжений в корне изменил механизмы отказов изоляции и соответствующие факторы обеспечения надежности. Если раньше основными формами отказа были только электрический или тепловой пробой, то для современной авионики характерны электрохимические процессы отказов, свойственные в основном аппаратуре тропического исполнения и морского базирования. Пользователи авиационной аппаратуры, построенной на высокоинтегрированной элементной базе, так или иначе сталкивались с новыми явлениями отказа изоляции, механизм и соответствующие меры предотвращения которых были не известны. В статье излагаются принципы расчета электроизоляционных конструкций из композиционных материалов, рассматривается механизм увлажнения и развития процессов деградации изоляции печатных плат – основного конструктивного элемента электроники и, в частности, авионики.

*Ключевые слова:* авионика, электрическая изоляция, электрохимические процессы отказов, композиционные материалы

The use of electric insulation structures applied in avionics is characterized by certain specific features, such as extreme conditions of their operation and compact sizes of insulation components, which entails difficulties in making them with a sufficient safety margin. At the same time, the low level of operating voltages has led to radical changes in

the mechanisms governing insulation failures and in the relevant reliability assurance factors. Earlier, only electric and thermal breakdown were the main factors causing failures, whereas electrochemical failure processes have become typical for modern avionics, which are mainly pertinent to equipment designed for tropic and maritime applications. The users of aircraft equipment constructed on the basis of highly integrated electronic components faced in some or other way new insulation failure phenomena, the mechanism and corresponding measures for preventing which were not known. The article outlines the principles of calculating electric insulation structures made of composite materials, and the mechanism governing moistening and development of insulation degradation processes in printed circuit boards, which are the main structural component of electronics and, in particular, avionics, is considered.

*Key words:* avionics, electric insulation, electrochemical failure processes, composite materials

*Электричество, 2016, №2, с.52–57.*

#### **Электротрансмиссия транспортных средств на базе вентильных машин комбинированного возбуждения**

ГАНДЖА С.А., КИЕСШ И.Е.

Показано преимущество применения вентильной машины комбинированного возбуждения (от постоянных магнитов и обмотки возбуждения) для электрической трансмиссии транспортных средств по сравнению с машинами: вентильной магнитоэлектрической, вентильно-индукторной и асинхронной. Преимущество заключается в уменьшении габаритов самой машины и электронной системы управления, которая может осуществляться по слаботочной цепи возбуждения. Дано описание запатентованной конструкции машины и принципа ее действия. Показано моделирование электромагнитных полей с применением метода конечных элементов. Приведены результаты тестирования опытных образцов.

*Ключевые слова:* вентильная машина, комбинированное возбуждение, постоянные магниты, обмотка возбуждения, регулирование магнитного потока, моделирование электромагнитного поля, средства транспорта

The article shows the advantage of using a converterfed machine with combined excitation (from permanent magnets and field winding) for organizing electrical transmission of vehicles as compared with other types of machines: converterfed magnetolectric, converterfed inductor, and asynchronous ones. The advantage consists in that a converterfed machine with combined excitation has a more compact design, and so is its electronic control system owing to the possibility of performing control via the low current excitation circuit. The patented design of the machine and the principle of its operation are described. Simulation of the electromagnetic fields using the finite element method is shown, and the results from testing experimental models are given.

*Key words:* converterfed machine, combined excitation, permanent magnets, field winding, magnetic flux control, simulation of electromagnetic field, means of transport

*Электричество, 2016, № 2, с. 57–64.*

**Математическое моделирование явнополюсных синхронных двигателей с автоматическим подбором параметров локальных характеристик намагничивания**  
ШРЕЙНЕР Р.Т., ПОЛЯКОВ В.Н., МЕДВЕДЕВ А.В.

Цель работы – создание математической модели двигателя, пригодной для аналитических расчетов и построения систем управления электроприводами с явнополюсными синхронными двигателями. Для этого модифицирован метод локальных характеристик намагничивания дополнением его процедурой автоматического подбора параметров. Разработан цифровой алгоритм расчета интегральных характеристик намагничивания, предназначенный для уточненного математического моделирования явнополюсных синхронных двигателей. Приведены графики распределения магнитной индукции в локальных сечениях интегральных характеристик намагничивания, подтверждающие возможность учета насыщения и взаимовлияния процессов по ортогональным осям. Представлены результаты моделирования динамических режимов явнополюсного синхронного электродвигателя в системе векторного управления, построенной на основе полученных интегральных вектор-функций намагничивания.  
*Ключевые слова:* синхронный явнополюсный двигатель, моделирование, учет насыщения магнитной цепи, метод локальных характеристик намагничивания, автоматический подбор параметров

The article addresses the problem of simulating salientpole synchronous motors taking into account saturation and interaction of processes along the orthogonal axes. The aim of this work is to develop a motor mathematical model suitable for carrying out analytical calculations and for developing control systems for electric drives equipped with salientpole synchronous motors. To this end, the method of local magnetizing characteristics has been modified by supplementing it with a procedure for automatically selecting the parameters. A digital algorithm for calculating the integral magnetization characteristics intended for mathematically modeling salientpole synchronous motors in a more accurate manner has been developed. Graphs depicting the distribution of magnetic induction in local sections and the integral magnetization characteristics are presented, which confirm the possibility of taking into account saturation and mutual influence of the processes along the orthogonal axes. The article also presents the results obtained from simulating dynamic operating modes of a salientpole synchronous electric motor in a vector control system constructed using the obtained integral magnetization vector functions. The materials presented in the article can be used in calculating steady-state and dynamic operating modes of salientpole and nonsalientpole synchronous motors and in constructing optimized systems for frequency control of synchronous electric drives.  
*Key words:* synchronous salient-pole motor, electromagnetic excitation, accounting the magnetic circuit magnetization, method of local magnetization characteristics, automatic selection of parameters

**Потери на ионизацию газовых включений и неполный пробой диэлектриков на основе стекла**

КУСТОВ Е.Ф., СЕРЕБРЯННИКОВ С.В., КУСТОВ М.Е.

Выведена формула относительной плотности тока при ионизации газовых включений в диэлектрике, которая объясняет увеличение диэлектрических потерь, уменьшение результирующей диэлектрической проницаемости и электрической прочности. Показано, что с увеличением размеров газовых включений значение тока ионизации уменьшается, зависимость электрического поля от напряженности становится пологой кривой, насыщение наступает при меньших значениях  $E$ . Исследуется явление неполного пробоя стекла за счет ионизации воздушных включений, выведена формула для пробивной напряженности  $E_{пр}$  при разрушении стекла по микротрещинам, рассчитаны значения  $E_{пр}$  для многих неорганических материалов, щелочно-галогидных соединений, стекол. Рассматривается явление электрического упрочнения диэлектриков в магнитном поле. Магнитное поле уменьшает ток ударной ионизации и увеличивает электрическую прочность. Влияние магнитного поля зависит от подвижности носителей заряда, поэтому электрическое упрочнение должно наблюдаться в материалах с большой подвижностью зарядов.

*Ключевые слова:* диэлектрик, газовые включения, ионизация, плотность тока, диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность

A formula for relative density of current resulting from ionization of gas inclusions in a dielectric is derived, which describes the growth of dielectric losses, the decrease of resulting dielectric constant, and the decrease of electric strength. It is shown that, as gas inclusions grow in size, the ionization current tends to decrease, the dependence of electric field on its strength becomes flatter, and saturated state is achieved at lower values of  $E$ . The incomplete glass breakdown phenomenon caused by ionization of air inclusions is studied; a formula for breakdown field strength  $E_{br}$  with glass fractured through micro cracks is derived; and the values of  $E_{br}$  for many inorganic materials, alkali-haloid compounds, and glasses are calculated. The phenomenon of electric strengthening of dielectrics in magnetic field is considered. Application of magnetic field results in a smaller shock ionization current and in a higher electric strength. Since the influence of magnetic field depends on the mobility of charge carriers, the electric strengthening phenomenon should be observed in materials with high mobility of charges.

*Key words:* dielectric, gas inclusions, ionization, current density, dielectric losses, dielectric constant, electric strength

**Николай Алексеевич Умов** (К 170-летию со дня рождения)

**Nikolai Alekseyevich Umov** (To Mark the 170th Anniversary)