

## **Содержание**

### **Экспериментальная оценка влияния формы импульсов ударного тока на тепловое состояние полупроводникового прибора**

АТАНОВ И.В., ХОРОЛЬСКИЙ В.Я., ГАБРИЕЛЯН Ш.Ж., ЖДАНОВ В.Г.

Выполнена экспериментальная оценка влияния формы импульсов ударного тока на тепловое состояние полупроводникового прибора. Описан технологический процесс изменения параметров прибора при воздействии возмущающих факторов. На основании уравнения теплового баланса получено аналитическое выражение для оценки температуры кристалла полупроводникового прибора. Приведены экспериментальные зависимости, характеризующие изменение параметров прибора при воздействии импульсов ударного тока различной формы. Дано сопоставление характеристик прибора при использовании импульсов тока синусоидальной формы и импульсов постоянного тока.

**Ключевые слова:** полупроводниковые приборы, тепловое состояние, ударный ток, форма импульса, эксперимент.

An experimental evaluation of the influence of the shape of shock current pulses on the thermal state of a semiconductor device has been performed. The technological process of changing the parameters of the device under the influence of disturbing factors is described. Based on the heat balance equation, an analytical expression for estimating the crystal temperature of a semiconductor device is obtained. Experimental dependences characterizing the change in the parameters of the device under the influence of shock current pulses of various shapes are given. A comparison of the characteristics of the device when using sinusoidal current pulses and DC pulses is given.

**Key words:** semiconductor devices, thermal state, shock current, pulse shape, experiment.

**О точности регулирования дискретных значений тока и напряжения в установках для испытания силовых полупроводниковых приборов**

АНТОНОВ С.Н., ОСЬКИН С.В., АНИКУЕВ С.В., ЯРОШ В.А.

На основе общей теории регулирования дискретных величин рассмотрена методика достижения необходимой точности параметров испытательных импульсов при проверке силовых полупроводниковых приборов. Отмечены особенности дискретного регулирования по сравнению с непрерывными системами. Рассмотрен режим ненасыщенного трансформатора. В результате процесс регулирования параметров напряжения и тока представлен в виде линейной системы без учета апериодической составляющей. Точность формирования системы импульсов предложено оценивать значением установившейся ошибки и для ее исследования использовать аппарат операторного исчисления. Получено выражение для расчета ошибки. Предложены методические положения по обоснованию количества каналов регулирования и установлению допустимой погрешности регулирования испытательных импульсов.

**Ключевые слова:** силовые полупроводниковые приборы, испытательные установки, дискретные значения тока и напряжения, точность регулирования.

On the basis of the general theory of regulation of discrete quantities, a technique for achieving the necessary accuracy of the parameters of test pulses when checking power semiconductor devices is considered. The features of discrete regulation in comparison with continuous systems are noted. The unsaturated transformer mode is considered. As a result, the process of regulating voltage and current parameters is presented in the form of a linear system without taking into account the aperiodic component. The accuracy of the pulse system formation is proposed to be estimated by the value of the steady-state error and to use the apparatus of operator calculus for its study. An expression for calculating the error is obtained. Methodological provisions are proposed to substantiate the number of control channels and to establish the permissible error in regulating test pulses.

**Key words:** power semiconductor devices, test installations, discrete values of current and voltage, control accuracy.

*Электротехника, 2022, №7, стр.10-13*

**Оценка эксплуатационной надежности электротехнических изделий по совокупности дефектов и отказов**

ХОРОЛЬСКИЙ В.Я., ИСУПОВА А.М., ШАРИПОВ И.К., ШЕМЯКИН В.Н.

Статья посвящена оценке эксплуатационной надежности электротехнических изделий, используемых в электрических сетях. При этом учитываются возникающие в оборудовании дефекты, требующие оперативного устранения, и отказы, приводящие к отключению электроснабжения потребителей. В качестве показателя надежности рассматривается коэффициент готовности. Сформулирована оптимизационная задача, связанная с учетом количества возникающих дефектов. Процесс появления дефектов и отказов рассматривается в виде импульсного потока. Получены аналитические выражения для расчета коэффициента готовности и определения его оптимального значения. Приводится пример решения подобных задач.

**Ключевые слова:** электротехническое изделие, эксплуатационная надежность, коэффициент готовности, оптимизация.

The article is devoted to the evaluation of the operational reliability of electrical products used in electrical networks. At the same time, defects arising in the equipment that require prompt elimination and failures leading to a power outage of consumers are taken into account. The availability coefficient is considered as an indicator of reliability. The process of defects and failures is considered in the form of a pulse flow. The apparatus of probability theory and mathematical statistics is used. Analytical expressions are obtained for calculating the availability coefficient and determining its optimal value. An example of solving such problems is given.

**Key words:** electrical product, operational reliability, availability factor, optimization.

*Электротехника, 2022, №7, стр.14-18*

**Разработка и исследование опытного образца испытательной установки для оценки качества электроизоляционных материалов**

ВОРОТНИКОВ И.Н., МАСТЕПАНЕНКО М.А., ГАБРИЕЛЯН Ш.Ж., МИШУКОВ С.В.

Для определения влажности материалов предложен способ идентификации параметров многоэлементных двухполюсников, исследования которого выполнены с помощью имитационного моделирования в среде SimInTech. Проведено сравнение предлагаемого способа с известным решением. Натурные исследования опытного образца испытательной установки подтвердили преимущества предлагаемого способа; результаты измерений показали значительно меньшую предельную относительную погрешность по сравнению с измерениями при помощи образцовых приборов.

**Ключевые слова:** электроизоляционные материалы, испытательная установка, многоэлементный двухполюсник, имитационное моделирование, погрешность.

To determine the moisture content of materials, a method is proposed for identifying the parameters of multi-element bipolar devices, the studies of which were carried out using simulation modeling in the SimInTech environment. The proposed method is compared with the known solution. Full-scale studies of the prototype of the test installation confirmed the advantages of the proposed method; the measurement results showed a significantly lower marginal relative error compared to measurements using model instruments.

**Key words:** electrical insulation materials, test installation, multi-element bipolar, simulation modeling, error.

*Электротехника, 2022, №7, стр.19-22*

**Стабилизатор напряжения постоянного тока с улучшенными параметрами**

БОНДАРЬ С.Н., ВАХТИНА Е.А., ВОРОТНИКОВ И.Н., ВОСТРУХИН А.В.

Развитие цифровых технологий, находящих широкое применение в промышленности и сельском хозяйстве, предъявляет повышенные требования к источникам стабилизированного напряжения по целому ряду параметров, каждый из которых по своему важен. Однако дальнейшее повышение разрешающей способности аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, а значит, и всей цифровой обработки сигналов, невозможно без улучшения коэффициентов стабилизации напряжения и тока по входному напряжению, а также температурного коэффициента напряжения. В

статье рассмотрен способ и схемное решение построения стабилизатора напряжения постоянного тока, качественные показатели которого, в частности, коэффициент стабилизации напряжения по входному напряжению, коэффициент стабилизации тока по входному напряжению и температурный коэффициент напряжения, значительно превышают типовые.

**Ключевые слова:** стабилизатор напряжения, температурный коэффициент напряжения, коэффициент стабилизации.

The development of digital technologies, which are widely used in industry and agriculture, places increased demands on sources of stabilized voltage for a number of parameters, each of which is important in its own way. However, a further increase in the resolution of analog-to-digital and digital-to-analog converters, and hence the entire digital signal processing, is impossible without improving the voltage and current stabilization coefficients for the input voltage, as well as the temperature voltage coefficient. The article considers a method and a circuit solution for constructing a DC voltage stabilizer, the quality indicators of which, in particular, the voltage stabilization coefficient for the input voltage, the current stabilization coefficient for the input voltage and the temperature voltage coefficient, significantly exceed the typical ones.

**Key words:** voltage stabilizer, temperature coefficient of voltage, coefficient of stabilization.

*Электротехника, 2022, №7, стр.23-27*

**Методика расчета магнитной системы осесимметричной цилиндрической модели синхронного генератора с двухконтурной магнитной системой**

НИКИТЕНКО Г.В., АТАНОВ И.В., КОНОПЛЕВ Е.В., ЛЫСАКОВ А.А.

Представлена методика расчета магнитных систем с учетом раздела сред для плоских и объемных моделей на основе метода конечных разностей. Разработан методический аппарат для расчета магнитной системы на примере синхронного генератора с двухконтурной магнитной системой. Получены результаты расчета вектора магнитной индукции на плане сектора генератора, построены графики изменения нормальной составляющей вектора магнитной индукции по сечению для плоской и объемной модели

генератора.

**Ключевые слова:** электрогенератор, синхронная машина, метод конечных разностей.

The method of calculation of magnetic systems taking into account the separation of media for flat and volumetric models based on the finite difference method is presented. A methodological apparatus for calculating the magnetic system has been developed using the example of a synchronous generator with a two-circuit magnetic system. The results of the calculation of the magnetic induction vector on the generator sector plan are obtained, graphs of the change in the normal component of the magnetic induction vector along the cross section for a flat and volumetric generator model are constructed.

**Key words:** electric generator, synchronous machine, finite difference method.

*Электротехника, 2022, №7, стр.28-30*

#### **Методика определения оптимальной длительности технического обслуживания электротехнических изделий**

ИСУПОВА А.М., МАСТЕПАНЕНКО М.А., ХОРОЛЬСКИЙ В.Я., ШАРИПОВ И.К., ШЕМЯКИН В.Н.

Техническое обслуживание и ремонт электротехнических изделий, связанных с производством, передачей и распределением электроэнергии, могут приводить к перерывам электроснабжения потребителей. В такой ситуации важное значение приобретает минимизация длительности обслуживания и ремонта. В настоящее время показатель, характеризующий длительность технического обслуживания, для большинства электротехнических изделий не нормируется и зависит от сложности устройства и его схемно-конструктивного решения. В статье предложена математическая модель, связывающая указанный параметр с эффективностью функционирования электротехнического изделия и другими эксплуатационными показателями.

**Ключевые слова:** электротехнические изделия, техническое обслуживание, ремонт, длительность, математическая модель.

Maintenance and repair of electrical products related to the production, transmission and distribution of electricity can lead to interruptions in the power supply of consumers. In such a situation, the minimization of the duration of maintenance and repair becomes important. Currently, the indicator characterizing the duration of maintenance is not standardized for most electrical products and depends on the complexity of the device and its circuit design. The article proposes a mathematical model linking this parameter with the efficiency of the functioning of an electrical product and other operational indicators.

**Key words:** electrical products, maintenance, repair, duration, mathematical model.

*Электротехника, 2022, №7, стр.31-40*

### **Тиристорные регуляторы переменного напряжения для повышения качества электрической энергии в распределительных сетях 0,4 кВ**

РАШИТОВ П.А., АСТАШЕВ М.Г., ПАНФИЛОВ Д.И., РОЖКОВ А.Н., ПЕТРОВ М.И.

Рассмотрены требования к тиристорным регуляторам переменного напряжения при обеспечении нормированных показателей качества электрической энергии в электрических сетях. Представлена технология построения тиристорных регуляторов переменного напряжения, основанная на применении вольтодобавочного трансформатора с секционированной обмоткой и тиристорного коммутатора. Показаны преимущества использования коммутаторов на основе тиристорных ключей в составе регуляторов переменного напряжения. Предложена методика расчета параметров вольтодобавочного трансформатора для обеспечения заданного шага регулирования вольтодобавочного напряжения и равномерного распределения его уровней. Сформулированы критерии и проведен анализ различных топологий тиристорных коммутаторов в составе тиристорных регуляторов переменного напряжения. Рассмотрены требования к алгоритмам управления регуляторов при изменении режимов работы сети. Предложены имитационные модели и приведены результаты моделирования режимов работы тиристорных регуляторов в составе сети. Приведены результаты опытно-промышленной эксплуатации регуляторов на электросетевых объектах, подтверждающие эффективность предложенных технических решений.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, тиристорный регулятор переменного напряжения, тиристорный коммутатор, алгоритмы управления, опытно-промышленный образец.

The requirements for thyristor regulators of alternating voltage when providing standardized indicators of the quality of electrical energy in electrical networks are considered. The technology of construction of thyristor regulators of alternating voltage is presented, based on the use of a voltage-add transformer with a partitioned winding and a thyristor switch. The advantages of using switches based on thyristor switches as part of AC voltage regulators are shown. A method is proposed for calculating the parameters of a surge transformer to ensure a given step of regulation of the surge voltage and a uniform distribution of its levels. The criteria are formulated and the analysis of various topologies of thyristor switches as part of thyristor regulators of alternating voltage is carried out. The requirements for the control algorithms of regulators when changing the operating modes of the network are considered. Simulation models are proposed and the results of modeling the operating modes of thyristor regulators in the network are presented. The results of pilot operation of regulators at power grid facilities are presented, confirming the effectiveness of the proposed technical solutions.

**Key words:** quality of electrical energy, thyristor AC voltage regulator, thyristor switch, control algorithms, pilot industrial design.

*Электротехника, 2022, №7, стр.41-45*

**Аналитический расчёт магнитного поля синхронной машины с неравномерным воздушным зазором**

АФАНАСЬЕВ А.А.

Предложен способ конформного отображения неравномерного воздушного зазора явнополюсной синхронной машины на круговое кольцо, основанный на представлении кольца переменной ширины в комплексной плоскости  $z$  в виде совокупности участков двух неконцентричных окружностей, соседние из которых сдвинуты друг относительно друга на полюсное деление. Магнитное поле в круговом кольце комплексной плоскости  $t$  может рассчитываться как решение первой краевой задачи с известными скалярными магнитными потенциалами на границах, которые, как известно, инвариантны при конформных преобразованиях. Магнитные индукции в кольце переменной ширины плоскости  $z$  находятся путем умножения найденных индукций в круговом кольце плоскости  $t$  на модуль известной, из поставленной задачи, производной. Расчёт был

апробирован применительно к геометрии Саяно-Шушенского гидрогенератора средствами программы MATHCAD.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, магнитное поле, неравномерный воздушный зазор, конформные отображения, краевая задача.

The proposed method of conformal mapping uneven air gap salient pole synchronous machine in a circular ring, based on the representation ring of variable width in the complex plane as a set of two plots concentric circles nearby of which are shifted relative to each other on the pole division. The magnetic field in a circular ring of the complex plane  $t$  can be calculated as a solution to the first boundary value problem with known scalar magnetic potentials at the boundaries, which are known to be invariant under conformal transformations. The magnetic inductions in a ring of variable plane  $z$  width are found by multiplying the inductions found in a circular ring of the plane  $t$  by the modulus of the derivative known from the problem. The solution was tested in relation to the geometry of the Sayano-Shushensky hydrogenerator by means of the MATHCAD program.

**Key words:** synchronous generator, magnetic field, non-uniform air gap, conformal maps, boundary value problem.

*Электротехника, 2022, №7, стр.46-57*

### **Миниатюризация электрических машин возможна**

ГАНДИЛЯН С.В., ГАНДИЛЯН Д.В.

Рассмотрено современное состояние нового направления микросистемной техники - микросистемной электромеханики, проанализирован широкий спектр его практических применений и перспективы дальнейшего развития. Подробно обсуждены основные технологические пути создания функциональных элементов микро- и наноэлектромеханических преобразователей энергии: «сверху вниз» и «снизу вверх». Охарактеризованы области их перспективного применения в традиционной и новой технике (в информационных и компьютерных технологиях, медицине, аэрокосмических и ракетно-артиллерийских системах и т.д.). Рассмотрены некоторые узловые вопросы обобщенного физико-математического моделирования таких преобразователей. Предложен обобщенный подход к исследованию их динамических и энергетических

характеристик как сложных динамических систем с бинарно-сопряженными подсистемами.

**Ключевые слова:** электромеханические преобразователи энергии, микроминиатюрная электромеханика, наноэлектромеханика, бинарно-сопряженные системы.

The current state of a new direction of microsystem technology - microsystem electromechanics is considered, a wide range of its practical applications and prospects for further development are analyzed. Two main technological ways of creating functional elements of micro- and nanoelectromechanical energy converters are discussed in detail: "top-down" and "bottom-up". The areas of their prospective application in traditional and new technology (in information and computer technologies, medicine, aerospace and rocket-artillery systems, etc.) are characterized. Some key issues of generalized physical and mathematical modeling of such converters are considered. A generalized approach to the study of their dynamic and energy characteristics as complex dynamic systems with binary-conjugate subsystems is proposed.

**Key words:** electromechanical energy converters, microminiature electromechanics, nanoelectromechanics, binary conjugate systems.

*Электротехника, 2022, №7, стр.58-59*

**Авторы номера**