

## Содержание

Электротехника, 2025, №1, стр. 2-8

### **О модели «скин-эффекта» в проводнике при наличии высших гармоник**

БЕЛОСВЕТОВ А.В., МАНУСОВ В.З., ОСИПОВ Д.С., ШЕПЕЛЕВ А.О.

Рассмотрены и проанализированы существующие модели учета «скин-эффекта» в проводниках. Разработана математическая модель, отличающаяся повышенной точностью и позволяющая определить коэффициент увеличения активного сопротивления по отношению к сопротивлению постоянному току  $k_v(f)$  для проводников различного сечения, включая сталеалюминиевые провода марки АС. Разработана модель, основанная на кусочно-линейной аппроксимации зависимости  $k_v(f)$  с учетом сечения проводников. Модель позволяет учитывать дополнительные потери активной мощности от высших гармоник при повышении частоты до 1000 Гц.

**Ключевые слова:** активное сопротивление проводников, переменный ток, «скин-эффект», высшие гармоники, потери активной мощности, коэффициент увеличения активного сопротивления.

The existing models of accounting for the «skin effect» in conductors are considered and analyzed. A mathematical model has been developed that is characterized by increased accuracy and allows determining the coefficient of increase in active resistance relative to direct current resistance  $k_v(f)$  for conductors of various cross-sections, including aluminum steel wires of the AC brand. A model based on a piecewise linear approximation of the  $k_v(f)$  dependence, taking into account the cross section of the conductors, has been developed. The model allows you to take into account additional losses of active power from higher harmonics when the frequency increases to 1000 Hz.

**Key words:** active resistance of conductors, alternating current, "skin effect", higher harmonics, loss of active power, coefficient of increase of active resistance.

**Проектирование и испытания авиационного генератора переменного тока с улучшенными массогабаритными показателями**

ИВАНОВ Н.С., ЖУРАВЛЕВ С.В., ШИРОКОВ А.А., ШИРОКОВА М.В., ТРЕТЬЯК В.И., ПОЗДЕЕВ А.В., ШАБАЛИН Д.Н.

Рассматриваются разработка и испытания трехмашинного авиационного генератора мощностью 90 кВА. Выполнен расчет трех каскадов генератора с учетом исходных данных и взаимосвязей между каскадами. Для проверки и уточнения аналитического расчета в программе ANSYS Maxwell проведен конечно-элементный анализ каждого каскада. Методом конечных элементов проверены степень насыщения каскадов и значения магнитной индукции в различных частях генератора. Получены выходные характеристики каскадов. По результатам расчета изготовлены два образца генераторов и проведены испытания. Представлена часть результатов испытаний, а именно внешние характеристики подвозбудителя и основного генератора; выполнено сравнение показателей качества выходного напряжения основного генератора, полученных экспериментально и методом конечно-элементного анализа.

**Ключевые слова:** авиационный синхронный трехкаскадный генератор, массогабаритные характеристики, конечно-элементный анализ, проектирование, испытания.

The development and testing of a three-car aviation generator with a capacity of 90 kVA are being considered. The calculation of the three cascades of the generator is performed, taking into account the initial data and the relationships between the cascades. To verify and refine the analytical calculation in the ANSYS Maxwell program, a finite element analysis of each cascade was performed. The degree of saturation of the cascades and the values of magnetic induction in various parts of the generator are verified by the finite element method. The output characteristics of the cascades are obtained. Based on the calculation results, two samples of generators were manufactured and tested. A part of the test results is presented, namely, the external characteristics of the exciter and the main generator; a comparison of the quality indicators of the output voltage of the main generator obtained experimentally and by the method of finite element analysis is performed.

**Key words:** aviation synchronous three-stage generator, weight and size characteristics, finite element analysis, design, testing.

**Анализ температурного поля низкоскоростного синхронного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением для ветряной турбины**

ИВАННИКОВ Ю.Н., ЗУБКОВ Ю.В., МАКАРИЧЕВ Ю.А.

Анализ теплового состояния электрической машины на этапе ее проектирования является неотъемлемой частью любого проекта. При создании крупных высоконагруженных генераторов достоверная информация о температурном поле машины служит основой обеспечения ее надежной и долговечной работы. Определение максимальных температур таких наиболее чувствительных к перегреву элементов, как изоляция обмотки и постоянные магниты – задача, включающая определение мощности источников тепловыделения, параметров схемы отвода тепла, расчета системы вентиляции и т.д.

Представлен комбинированный подход к проектированию и анализу системы охлаждения низкоскоростного ветрогенератора прямого привода, заключающийся в последовательном решении нескольких задач: расчете потерь в активных частях, численном *2D*-моделировании теплового поля с определением наиболее эффективной системы вентиляции и теплоотвода, уточненном *3D*-тепловом расчете обратной задачи для определения параметров продува охлаждающей среды по гидравлическому тракту.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, синхронный генератор с постоянными магнитами, тепловой расчет, повышение эффективности охлаждения.

The analysis of the thermal state of an electric machine at the design stage is an integral part of any project. When creating large high-load generators, reliable information about the temperature field of the machine serves as the basis for ensuring its reliable and long-lasting operation. Determining the maximum temperatures of such elements most sensitive to overheating as winding insulation and permanent magnets is a task that includes determining the power of heat sources, parameters of the heat removal circuit, calculation of the ventilation system, etc. A combined approach to the design and analysis of the cooling system of a low-speed direct drive wind generator is presented, which consists in sequentially solving several problems: calculating losses in active parts, numerical *2D* modeling of the thermal field with the determination of the most efficient ventilation and heat sink system, an updated *3D* thermal calculation of the inverse problem to determine the parameters of purging the cooling medium along the hydraulic tract.

**Key words:** wind power plant, synchronous generator with permanent magnets, thermal calculation, improvement of cooling efficiency.

**Аналитический расчёт электромеханических устройств в трёхмерном формате в прямоугольных координатах**

АФАНАСЬЕВ А.А.

Рассмотрены решения уравнения Лапласа для прямоугольного параллелепипеда в формах первой и второй граничных задач методом разделения переменных Фурье. На базе этих решений предложен аналитический расчёт электромеханических устройств с радиальным воздушным зазором, в которых ярмовые, зубцовые слои и воздушный зазор активной области представляются набором прямоугольных параллелепипедов с шириной, равной полюсному делению. Сопутствующие постоянные Фурье (две для элементарного параллелепипеда) находятся из характеристик магнитного поля на границах параллелепипедов: магнитные потенциалы и магнитные индукции одинаковы; при нахождении на границах магнитных листов (МДС обмоток) имеет место скачок потенциала на величину тока магнитного листа. Предложенным методом аналитически определены магнитные индукции и электромагнитный момент сверхминиатюрного магнитоэлектрического вентильного двигателя в прямоугольных координатах.

**Ключевые слова:** электромеханические устройства, магнитная индукция, электромагнитный момент, аналитический расчёт, уравнение Лапласа, постоянные Фурье, граничные условия.

Solutions of the Laplace equation for a rectangular parallelepiped in the forms of the first and second boundary value problems by the method of separation of Fourier variables are considered. Based on these solutions, an analytical calculation of electromechanical devices with a radial air gap is proposed, in which the yoke, tooth layers and the air gap of the active region are represented by a set of rectangular parallelepipeds with a width equal to the pole division. The accompanying Fourier constants (two for an elementary parallelepiped) are found from the characteristics of the magnetic field at the boundaries of parallelepipeds: magnetic potentials and magnetic inductions are the same; when located at the boundaries of magnetic sheets (MDS windings), there is a potential jump by the magnitude of the current of the magnetic sheet. The proposed method analytically determines the magnetic inductions and the electromagnetic moment of a superminiature magnetolectric valve motor in rectangular coordinates.

**Key words:** electromechanical devices, magnetic induction, electromagnetic moment, analytical calculation, Laplace equation, Fourier constants, boundary conditions.

*Электротехника, 2025, №1, стр. 31-45*

**Разработка методики расчета параметров СЛ-фильтра сетевого регулятора мощности на основе преобразователя тока**

ЛЕПАНОВ М.Г., КИСЕЛЕВ М.Г., КУРБАТОВА Е.П., АГЕЕВ В.А.

Рассмотрена работа трехфазного преобразователя тока (инвертора тока) с выходным СЛ-фильтром, обеспечивающего регулирование активной мощности, генерируемой в сеть (сетевого регулятора). Основное внимание уделено анализу характеристик фильтра и преобразователя с ШИМ управлением, на основе которого предложена методика определения параметров элементов выходного фильтра в соответствии с заданными требованиями. Результаты расчета параметров фильтра проверены посредством моделирования устройства в программе SimInTech.

**Ключевые слова:** преобразователь тока, инвертор тока, сетевой регулятор, индуктивный накопитель, широтно-импульсная модуляция.

The operation of a three-phase current converter (current inverter) with an output CL filter providing regulation of the active power generated into the network (network regulator) is considered. The main attention is paid to the analysis of the characteristics of the filter and the PWM-controlled converter, on the basis of which a method for determining the parameters of the output filter elements in accordance with the specified requirements is proposed. The results of calculating the filter parameters are verified by simulating the device in the SimInTech program.

**Key words:** current converter, current inverter, network regulator, inductive storage, pulse width modulation.

*Электротехника, 2025, №1, стр. 46-59*

**Методы управления состоянием мехатронных систем без измерения момента упругости механической части**

ТАРАРЫКИН С.В., АПОЛОНСКИЙ В.В., ДОРОЖКИН М.С.

При наличии упругих кинематических звеньев в механической части мехатронных систем эффективное управление этими системами может осуществляться на основе регуляторов состояния полного порядка. Однако трудности измерения момента упругости не позволяют использовать высокие потенциальные возможности таких управляющих

устройств, обуславливая их вынужденную замену более сложными динамическими (полиномиальными) «вход-выходными» регуляторами или регуляторами с наблюдателями состояния. В результате отсутствие измерителя только одной координаты состояния не позволяет использовать потенциальные возможности всех остальных. При этом сохраняется контроль лишь выходной координаты объекта с определенными потерями качества управления. В качестве альтернативных решений предлагаются системы, использующие оценку момента упругости по уравнению движения ротора двигателя или расширенный вектор состояния мехатронного объекта, приводящий к вынужденному введению интегральной составляющей в алгоритм управления. В качестве дополнительных могут использоваться гибкие (дифференцирующие) отрицательные обратные связи по определенным координатам состояния объекта. При этом выбор наиболее эффективного решения осуществляется по комплексу заданных критериев качества (робастность, инвариантность, помехоустойчивость, сложность и др.) с учетом особенностей механической части управляемого объекта, собственная частота колебаний которой может быть ниже или выше частоты среза синтезируемой системы. Выводы теоретических исследований подтверждены результатами компьютерного моделирования и натурных испытаний синтезированных мехатронных систем на многофункциональном экспериментальном стенде.

**Ключевые слова:** мехатронная система, управление состоянием, момент упругости, критерии качества, низкочастотная и высокочастотная механическая часть, экспериментальные исследования, компьютерное моделирование.

In the presence of elastic kinematic links in the mechanical part of mechatronic systems, effective control of these systems can be carried out on the basis of full-order state regulators. However, the difficulties of measuring the moment of elasticity do not allow using the high potential capabilities of such control devices, causing their forced replacement with more complex dynamic (polynomial) «input-output» regulators or regulators with state observers. As a result, the absence of a meter for only one state coordinate does not allow using the potential of all the others. At the same time, only the output coordinate of the object remains under control, with certain losses in control quality. As alternative solutions, systems are proposed that use an estimate of the moment of elasticity according to the equation of motion of the motor rotor or an extended state vector of a mechatronic object, leading to the forced introduction of an integral component into the control algorithm. Flexible (differentiating) negative feedbacks can be used as additional ones according to certain coordinates of the object's state. At the same time, the choice of the most effective solution is carried out according to a set of specified quality criteria

(robustness, invariance, noise immunity, complexity, etc.), taking into account the characteristics of the mechanical part of the controlled object, the natural oscillation frequency of which may be lower or higher than the cut off frequency of the synthesized system. The conclusions of theoretical research are confirmed by the results of computer modeling and field tests of synthesized mechatronic systems on a multifunctional experimental stand.

**Key words:** mechatronic system, state control, moment of elasticity, quality criteria, low-frequency and high-frequency mechanical part, experimental studies, computer modeling.

*Электротехника, 2025, №1, стр. 60-66*

### **Алгоритм обработки сигналов сегментированного датчика положения с плавным переключением между сегментами**

ТЯПКИН М.Г., ТОЛСТЫХ О.А., РАССУДОВ Л.Н., ТЯПКИН Г.М., БАЛКОВОЙ А.П.

В статье рассмотрены сегментированный линейный датчик положения и алгоритм обработки его сигналов. Сегментированный датчик применяется в автоматизированных модульных транспортных системах, состоящих из неподвижных модулей и подвижных кареток. Неподвижные модули включают в себя статор линейной синхронной машины и чувствительные элементы сегментированного датчика положения. Подвижные каретки перемещаются между неподвижными сегментами (модулями) и включают в себя вторичную часть электрической машины – магнитный путь ограниченной длины, а также измерительную шкалу сегментированного датчика положения. Для измерения абсолютного положения кареток каждый модуль передает в реальном времени информацию об измеренном положении на контроллер с применением высокоскоростной промышленной сети. Специальный программный алгоритм, реализованный в программируемом логическом контроллере, восстанавливает положение кареток на основании результатов измерения положения каждого модуля и схемой расположения модулей. Одной из задач повышения качества управления движением является обеспечение плавной обратной связи по положению на всем интервале движения каретки, в том числе при перемещении от одного модуля к другому. Представлен робастный алгоритм обработки сигналов, обеспечивающий плавное переключение между сегментами измерения с повышенной точностью благодаря алгоритму самокоррекции, который автоматически компенсирует сдвиги между соседними сегментами измерения. Экспериментальные результаты, полученные на прототипе модульной транспортной системы, подтвердили эффективность предложенного подхода.

**Ключевые слова:** датчик Холла, линейная синхронная машина с постоянными магнитами

и сегментированным статором, сегментированный датчик положения, самокоррекция ошибок датчика положения.

The article discusses a segmented linear position sensor and an algorithm for processing its signals. The segmented sensor is used in automated modular transport systems consisting of fixed modules and movable carriages. The fixed modules include the stator of a linear synchronous machine and the sensing elements of a segmented position sensor. Movable carriages move between fixed segments (modules) and include a secondary part of the electric machine – a magnetic path of limited length, as well as a measuring scale of a segmented position sensor. To measure the absolute position of the carriages, each module transmits real-time information about the measured position to the controller using a high-speed industrial network. A special software algorithm implemented in a programmable logic controller restores the position of the carriages based on the results of measuring the position of each module and the layout of the modules. One of the tasks of improving the quality of motion control is to ensure smooth position feedback over the entire range of carriage movement, including when moving from one module to another. A robust signal processing algorithm is presented that provides smooth switching between measurement segments with increased accuracy due to a self-correction algorithm that automatically compensates for shifts between adjacent measurement segments. The experimental results obtained on the prototype of the modular transport system confirmed the effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** Hall sensor, linear synchronous machine with permanent magnets and segmented stator, segmented position sensor, self-correction of position sensor errors.

*Электротехника, 2025, №1, стр. 67-73*

**Микро-ГЭС с технологией поиска точки максимальной мощности гидроагрегата**  
ЛУКУТИН Б.В., ШАНДАРОВА Е.Б., ПОПОВ М.М.

Показаны возможности работы микро-ГЭС в точке максимальной генерируемой мощности (MPPT-технологии) с целью более полного использования энергии водотока. Разработанная функциональная схема инверторной микро-ГЭС с MPPT-регулятором балласта и алгоритм её функционирования апробированы на имитационной модели, реализованной в программном комплексе MATLAB. Достаточно высокое быстродействие предлагаемой MPPT-технологии позволяет применять её практически для любых инверторных микро-ГЭС. Предложенные структурные схемы и алгоритмы управления

обеспечивают максимально эффективное использование гидравлической энергии малого водотока.

**Ключевые слова:** микро-ГЭС, энергоэффективность, алгоритм управления, аккумуляторный накопитель электроэнергии, балластная нагрузка.

The possibilities of operation of micro-hydroelectric power plant (HPP) at the point of maximum generated power (MGP-technologies) in order to more fully utilize the energy of the watercourse are shown. The developed functional scheme of an inverter micro-HPP with an MGP-ballast regulator and the algorithm of its operation have been tested on a simulation model implemented in the MATLAB software package. The sufficiently high performance of the proposed MGP-technology allows it to be used for almost any inverter micro-HPP. The proposed structural schemes and control algorithms ensure the most efficient use of the hydraulic energy of a small watercourse.

**Key words:** micro-hydroelectric power plant, energy efficiency, control algorithm, electric power accumulator, ballast load.

*Электротехника, 2025, №1, стр. 74-79*

### **Электрическая схема замещения аккумулятора и методика определения ее параметров**

БЕЛЕЙ В.Ф., ВЕСЕЛОВСКИЙ К.К.

На основе анализа электрохимических процессов, протекающих в никель-железных аккумуляторах, обоснована электрическая схема замещения аккумулятора. Предложена методика для определения параметров электрической схемы замещения для аккумуляторов различных электрохимических систем. На примере никель-железного аккумулятора типа ТНЖК-У2 определены параметры электрической схемы замещения: омическое сопротивление, сопротивление и емкость поляризации. На основе результатов экспериментальных исследований получены аналитические зависимости сопротивления и ёмкости поляризации от тока разряда и степени заряда аккумулятора; показано, что с увеличением тока разряда и степени заряда аккумулятора их значения снижаются. Установлено, что с увеличением тока разряда доля падения напряжения на омическом сопротивлении аккумулятора возрастает, что влияет на напряжение аккумуляторных батарей при их использовании в составе сетевых накопителей электрической энергии и электромобилей, поскольку в таких системах к омическому сопротивлению аккумуляторов добавляется сопротивление металлических перемычек и контактов.

**Ключевые слова:** аккумулятор, электрическая схема замещения, параметры, методика определения параметров.

Based on the analysis of electrochemical processes occurring in nickel-iron batteries, the electrical circuit of battery replacement is justified. A method is proposed for determining the parameters of an electrical replacement circuit for batteries of various electrochemical systems. Using the example of a nickel-iron battery of the TNZHK-U2 type, the parameters of the electrical replacement circuit are determined: ohmic resistance, resistance and polarization capacitance. Based on the results of experimental studies, analytical dependences of the polarization resistance and capacitance on the discharge current and the degree of charge of the battery are obtained; it is shown that with an increase in the discharge current and the degree of charge of the battery, their values decrease. It has been found that with an increase in the discharge current, the proportion of voltage drop on the ohmic resistance of the battery increases, which affects the voltage of the batteries when they are used as part of network drives of electric energy and electric vehicles, since in such systems the resistance of metal jumpers and contacts is added to the ohmic resistance of the batteries.

**Key words:** battery, electrical replacement circuit, parameters, method of determining parameters.

*Электротехника, 2025, №1, стр. 80-86*

### **Гибридные энергоустановки на базе электрохимических генераторов для морских транспортных средств**

ДМИТРИЕВ Б.Ф., ГАЛУШИН С.Я.

Рассмотрена гибридная энергетическая установка морского транспортного средства на базе водород-кислородного электрохимического генератора. Определены основные потребители электрической энергии, рассмотрены параметры гибридной энергоустановки на основе батарей топливных элементов и аккумуляторных батарей. Выполнен анализ системы управления электродвижением. Особое внимание уделено вопросам согласования работы электрохимического генератора, аккумуляторной батареи и суперконденсатора. Для решения этой проблемы предложено согласующее устройство на основе повышающе-понижающего преобразователя. Приведены структурная схема согласующего преобразователя, а также схема повышающе-понижающего преобразователя, которая рекомендуется в качестве согласующего устройства. Рассчитаны энергетические и массогабаритные показатели системы «электрохимический генератор –

согласующий преобразователь»

**Ключевые слова:** морское транспортное средство, гибридная энергетическая установка, топливные элементы, аккумуляторная батарея, суперконденсатор, согласующий преобразователь, система управления.

A hybrid power plant of a marine vehicle based on a hydrogen-oxygen electrochemical generator is considered. The main consumers of electric energy are identified, the parameters of a hybrid power plant based on fuel cell batteries and rechargeable batteries are considered. An analysis of the electromotion control system has been performed. Special attention is paid to the issues of coordinating the operation of an electrochemical generator, an accumulator battery and a supercapacitor. To solve this problem, a matching device based on a step-up converter is proposed. The block diagram of the matching converter is given, as well as the circuit of the step-up converter, which is recommended as a matching device. The energy and mass-dimensional parameters of the "electrochemical generator - matching converter" system are calculated.

**Key words:** marine vehicle, hybrid power plant, fuel cells, rechargeable battery, supercapacitor, matching converter, control system.

*Электротехника, 2025, №1, стр. 87-89*

**Авторы номера**