

## **Содержание**

### **Распределение потенциала в грунте при падении провода контактной сети железнодорожного транспорта**

КИМ К.К., ПАНЫЧЕВ А.Ю., БЛАЖКО Л.С.

Рассмотрено распределение потенциала в грунте при падении на него провода контактной сети железнодорожного транспорта. Показано, что в случае постоянного тока распределение потенциала и напряженности при удалении от источника является резко неравномерным, причем характер неравномерности изменяется с течением времени. Высокая температура в месте падения провода приводит к тому, что вблизи этой зоны наблюдается минимальное удельное сопротивление грунта, что в свою очередь вызывает в дальнейшем преимущественный нагрев приконтактной области. В случае постоянного тока при больших значениях температурного коэффициента сопротивления и положительной температуре окружающей среды, последняя практически не влияет на значение потенциала и плотности тока. Отрицательные температуры окружающей среды приводят к большим значениям электрического потенциала. Однако в приконтактной области потенциал изменяется более плавно, что обуславливает в этой области меньшие значения напряженности поля и плотности тока. При удалении от места контакта наиболее опасным, то есть приводящим к большим значениям потенциала и напряженности электрического поля, является диапазон температур от  $-2^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ . При переменном напряжении распределение температуры вглубь грунта от места падения провода является крайне неравномерным, причем с течением времени эта неравномерность еще более усиливается. Увеличение содержания влаги в грунте обуславливает резкое увеличение напряженности поля и плотности тока в приконтактной области. Однако, в удаленных от места падения провода областях эти значения в более сухой среде несколько выше чем во влажной.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, контактная сеть, падение провода, распределение потенциала, напряженность поля, плотность тока, характеристики грунта.

The distribution of the potential in the ground when the wire of the contact network of railway transport falls on it is considered. It is shown that in the case of direct current, the distribution of potential and voltage at a distance from the source is sharply uneven, and the nature of the unevenness changes over time. The high temperature at the point where the wire falls leads to the fact that there is a minimum specific resistance of the ground near this zone, which in turn causes further preferential heating of the contact area. In the case of direct current at large values of the temperature coefficient of resistance and a positive ambient temperature, the latter practically does not affect the value of the potential and current density. Negative ambient temperatures lead to large values of the electrical potential. However, in the near-contact region, the potential changes more smoothly, which causes lower values of the field strength and current density in this region. When moving away from the contact point, the most dangerous, that is, leading to large values of the potential and the electric field strength, is the temperature range from  $20^{\circ}\text{C}$  to  $0^{\circ}\text{C}$ . At an all place where the wire falls is extremely uneven, and this unevenness increases even more over time. An increase in the moisture content in the soil causes a sharp increase in the field strength and current density in the contact area. However, in areas far from the place of the wire fall, these values are slightly higher in a drier environment than in a wet one.

**Keywords:** railway transport, contact network, wire drop, potential distribution, field strength, current density, soil characteristics.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 10-14*

### **Оптимальное частотное управление асинхронными тяговыми электродвигателями электропоезда**

ПЕТРУШИН А.Д., ТИТОВА Т.С., НИКИТИН В.В., МАЗНЕВ А.С.

Показана возможность существенного снижения потерь энергии в асинхронном тяговом приводе при переходных режимах разгона и торможения. На основе допущений, соответствующих понятию обобщенной электрической машины, и математической модели асинхронного двигателя в неподвижных осях  $\alpha$  и  $\beta$ , с использованием принципа максимума определена функциональная зависимость частоты и амплитуды фазного напряжения асинхронного двигателя, обеспечивающая минимальное значение квадрата питающего напряжения. Эта зависимость позволяет существенно снизить электрические потери мощности в асинхронном тяговом двигателе при переходных режимах работы. В

качестве объекта моделирования выбран асинхронный тяговый двигатель электропоезда, получены графики изменения токов, электромагнитного момента и угловой скорости двигателя в процессе разгона с алгоритмом управления, обеспечивающим снижение потерь мощности.

**Ключевые слова:** электрический подвижной состав, энергоэффективность, асинхронный тяговый двигатель, оптимизация.

The article shows the possibility of a significant reduction in energy losses in an asynchronous traction drive during transient acceleration and deceleration modes. Based on assumptions corresponding to the concept of a generalized electric machine and a mathematical model of an induction motor in fixed axes  $\alpha$  and  $\beta$ , using the principle of maximum, the functional dependence of the frequency and amplitude of the phase voltage of an induction motor is determined, which minimizes the square of the supply voltage. This dependence can significantly reduce the electrical power losses in an asynchronous traction motor during transient operating modes. An asynchronous traction motor of an electric train was chosen as the object of modeling, graphs of changes in currents, electromagnetic moment and angular speed of the engine during acceleration were obtained with a control algorithm that ensures a decrease in power losses.

**Key words:** electric rolling stock, energy efficiency, asynchronous traction motor, optimization

*Электротехника, 2021, №10, стр. 15-20*

**Особенности проектирования контактно-аккумуляторного маневрового электровоза**

КОЛПАХЧЬЯН П.Г., ЕВСТАФЬЕВ А.М., НИКИТИН В.В., ЗАРИФЬЯН А.А.,  
ТАЛАХАДЗЕ Т.З., ТАЛАХАДЗЕ Н.В.

Рассмотрены вопросы создания контактно-аккумуляторного электровоза для маневровой работы. Выбраны структура и основные параметры тягового электропривода, определены тип тягового двигателя и его характеристики. Выполнено математическое моделирование локомотива в ходе маневровой работы с составом и без него. Определены основные параметры движения, нагрузка тягового электрооборудования, выполнена оценка тягово-энергетических показателей контактно-аккумуляторного электровоза.

**Ключевые слова:** контактно-аккумуляторный электровоз, асинхронный тяговый двигатель, тягово-энергетические расчеты.

The issues of creating a contact-battery electric locomotive for maneuvering work are considered. The structure and main parameters of the traction electric drive are selected, the type of traction motor and its characteristics are determined. The mathematical modeling of the locomotive was performed during shunting work with and without a train. The main parameters of movement, the load of traction electrical equipment were determined, the traction and energy indicators of a contact-battery electric locomotive were evaluated.

**Key words:** contact-battery electric locomotive, asynchronous traction motor, traction and energy calculations.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 21-27*

### **Метод и программа расчета энергоемкости железнодорожных перевозок на электрической тяге**

БУРКОВ А.Т., АГУНОВ А.В., СТЕПАНОВА К.К., ИВАНОВ М.А.

Предложен метод расчета расхода электрической энергии на перемещение железнодорожного состава с грузом или пассажирами, отличающийся возможностью определения энергии для реализации силы тяги движущихся осей локомотива без учета технологических потерь в устройствах тягового электроснабжения и тягового электропривода. Дано определение энергоемкости как показателя удельного электропотребления на ускорение, преодоление уклонов и сопротивления движению поезда, измеряемого в ватт-часах на тонну массы поезда и километр пройденного пути (Вт·ч/т·км). Метод основан на моделировании движения поезда с использованием аппроксимированной кривой скорости от времени и физико-математического решения уравнения движения. В результате получена функциональная зависимость пяти переменных – пройденного расстояния, времени движения, установившейся скорости, ускорения и замедления движения. Полученные характеристики движения поезда применяются при проектировании отдельных участков линии с интенсивным движением и определении ожидаемых показателей электропотребления. Для железнодорожной линии, состоящей из физических перегонов с заданными параметрами движения поезда, разработана расчетная методика и программа определения обобщенного показателя удельного электропотребления проектируемой линии. Сформулирована процедура отдельных этапов проектирования высокоскоростных и тяжеловесных линий на

электрической тяге.

**Ключевые слова:** электрическая тяга, энергоемкость тяги, удельное электропотребление, моделирование, аппроксимация характеристики движения поезда, проектирование высокоскоростных и тяжеловесных маршрутов.

A method for calculating the consumption of electrical energy for the movement of a railway train with cargo or passengers, differing in the possibility of determining energy, for the implementation of the traction force of the moving axes of the locomotive without taking into account technological losses in the devices of traction electric supply and traction electric drive, is presented. The definition of energy intensity is given as an indicator of the specific power consumption for acceleration, overcoming slopes and resistance to train movement, measured in watt-hours per ton of train mass and kilometer of distance traveled (Wh/t.km). The procedure is based on modeling the movement of a train using an approximated speed curve from time and a physical and mathematical solution of the equation of motion. As a result, the functional dependence of five variables is obtained: the distance traveled, the time of movement, the steady speed, acceleration and deceleration of movement. The obtained traffic characteristics are still used when designing individual sections of the line with intensive traffic and determining the expected power consumption indicators. For a railway line consisting of separate physical crossings with specified traffic parameters. They have developed a calculation method and a program for determining the average indicator of the specific electricity consumption of the projected line. The procedure of separate stages of designing high-speed and heavy-weight electric traction lines on a railway transport is formulated.

**Key words:** electric traction, power consumption of traction, specific power consumption, modeling, approximation of the characteristics of train movement, design of high-speed and heavy-weight routes.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 27-31*

### **Косвенное определение температуры обмоток асинхронного двигателя на основе расчета сопротивления ротора**

ПУГАЧЕВ А.А., МОРОЗОВ С.В., МАРИКИН А.Н., КРУЧЕК В.А.

Выполнен анализ существующих методов определения температуры обмоток асинхронных двигателей, который показал перспективность применения косвенных

методов без использования датчиков температуры. Предложен способ определения температуры обмоток асинхронного двигателя на основе расчета сопротивления ротора по сигналам от датчиков тока и напряжения статора, датчика частоты вращения, информации о частоте тока статора, параметров схемы замещения в номинальном режиме.

Синтезированы алгебраические уравнения сопротивления ротора, температуры обмоток статора и ротора при применении вращающейся двухфазной системы координат.

Достоверность полученных формул подтверждена с помощью моделирования в программном комплексе Matlab, при моделировании учтены магнитные потери двигателя и типовые нелинейности статора и ротора. Приведены и проанализированы результаты моделирования в переходных и установившихся режимах работы. Показано, что в установившихся режимах работы относительная погрешность не превышает 7%. Даны рекомендации по использованию предложенной методики определения температуры в системах управления электроприводов.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, система векторного управления, определение температуры обмоток, моделирование.

The analysis of the existing methods for determining the temperature of the windings of asynchronous motors was performed, which showed the prospects of using indirect methods without using temperature sensors. A method for determining the winding temperature of an asynchronous motor is proposed based on the calculation of the rotor resistance based on signals from the current and voltage sensors of the stator, the speed sensor, information about the frequency of the current of the stator, the parameters of the replacement circuit in the nominal mode. The algebraic equations of the rotor resistance, the temperature of the stator and rotor windings are synthesized when using a rotating two-phase coordinate system. The reliability of the obtained formulas is confirmed by modeling in the MATLAB software package, when modeling, losses in the engine steel and typical non-linearities of the stator and rotor are taken into account. The results of modeling in transient and steady-state modes of operation are presented and analyzed. It is shown that in steady-state operating modes, the relative error does not exceed 7%. Recommendations on the use of the proposed method for determining the temperature in the control systems of electric drives are given.

**Key words:** asynchronous motor, vector control system, determination of winding temperature, modeling.

**О применении тяговых аккумуляторных батарей на автономных подстанциях городского электротранспорта**

САЦУК Т.П., ШАРЯКОВ В.А., ШАРЯКОВА О.Л., ЛЕБЕДЕВА В.А., МАКАРОВА Е.И.

Рассмотрена возможность использования тяговых аккумуляторных батарей, не до конца выработавших срок службы, на автономных стационарных или мобильных подстанциях. Автономные подстанции могут работать в двух режимах – как источник резервного питания и как стабилизатор напряжения контактной сети. Предложенные математические соотношения позволяют построить имитационную модель работы автономной подстанции в режиме стабилизатора напряжения. Показано, что при использовании тяговых аккумуляторных батарей на автономной подстанции возможна коррекция напряжения контактной сети, при этом циклы заряда-разряда самих батарей минимальны и, соответственно, срок службы таких накопителей энергии значительно увеличится.

**Ключевые слова:** городской электротранспорт, тяговый электропривод, литий-ионные тяговые аккумуляторные батареи, стабилизация напряжения контактной сети, рекуперативное торможение, имитационное моделирование.

The possibility of using traction batteries that have not fully developed their service life on autonomous stationary or mobile substations is considered. Autonomous substations can operate in two modes – as a backup power source and as a voltage stabilizer of the contact network. The proposed mathematical relations allow us to build a simulation model of the operation of an autonomous substation in the voltage stabilizer mode. It is shown that when using traction batteries at an autonomous substation, it is possible to correct the voltage of the contact network, while the charge-discharge cycles of the batteries themselves are minimal and, accordingly, the service life of such energy storage devices will significantly increase.

**Key words:** urban electric transport, traction electric drive, lithium-ion traction batteries, voltage stabilization of the contact network, regenerative braking, simulation modeling.

**Анализ свойств и уточненное определение характеристик электромеханических магнитореологических демпферов**

КАЗАКОВ Ю.Б., МОРОЗОВ Н.А., НЕСТЕРОВ С.А., ФИЛИППОВ В.А.

Рассматриваются и анализируются свойства и характеристики электромеханических магнитореологических демпферов, способных оперативно изменять свою жесткость с изменением условий работы. Показано, что корректная разработка таких демпферов и уточненное определение их характеристик осложняется необходимостью учета взаимосвязанных электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов. Анализируются подходы к описанию свойств магнитореологических демпферов и учету протекающих физических процессов. Рассматриваются математические модели разной сложности. Представлены результаты расчетов показателей работы и свойств магнитореологических демпферов по разным моделям, приведено обсуждение полученных результатов. Приведены сравнительные результаты расчетов и экспериментальных исследований силы сопротивления демпфера. Выявлено, что наиболее корректные результаты определения характеристик магнитореологических демпферов, с разницей не более 7 % по отношению к экспериментальным данным, при значительных скоростях движения поршня обеспечивают методы расчета с учетом взаимного влияния магнитных, гидродинамических и тепловых процессов. Неучёт напряжения начального сдвига магнитореологической суспензии и влияния на нее магнитного поля и температуры может приводить к более чем 50%-ной погрешности определения начального усилия.

**Ключевые слова:** электромеханический магнитореологический демпфер, магнитореологическая суспензия, взаимное влияние магнитных, гидродинамических и тепловых процессов, определение характеристик.

The article considers and analyzes the properties and characteristics of electromechanical magnetorheological dampers, which are able to quickly change their rigidity with changing operating conditions. It is shown that the correct development of magnetorheological dampers and the refined determination of their characteristics are complicated by the need to take into account the interrelated electromagnetic, hydrodynamic and thermal processes. The approaches to describing the properties of magnetorheological dampers and taking into account the ongoing physical processes are analyzed. Mathematical models of varying complexity are considered. The results of calculations of performance indicators and properties of magnetorheological dampers according to different models are presented, and a discussion of the results obtained is given. Comparative results of calculations and experimental studies of the damper resistance force are presented. It was revealed that the most correct results of determining the characteristics of magnetorheological dampers, with an error of no more than 7% in comparison with experiments, at significant speeds of piston movement, are provided by calculation methods



taking into account the mutual influence of magnetic, hydrodynamic and thermal processes. Failure to take into account the stress of the initial shear of the magnetorheological suspension and the influence of the magnetic field and temperature on it can lead to an error in determining the initial force more than 50%.

**Key words:** electromechanical magnetorheological damper, magnetorheological suspension, mutual influence of magnetic, hydrodynamic and thermal processes, defining characteristics.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 44-50*

**Электрические потери и электродинамические усилия в магнитной системе электрического генератора с обмотками из высокотемпературных сверхпроводящих материалов**

КУРБАТОВ П.А., КУРБАТОВА Е.П., ДЕРГАЧЕВ П.А., ДРОЗДОВ А.А.

Решение задач, возникающих при проектировании сверхпроводящих электрических машин, сталкивается с трудностями моделирования электромагнитных процессов из-за сложных нелинейных зависимостей критических параметров высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент от магнитной индукции, температуры и протекаемого тока. В статье рассматриваются возможные подходы к определению таких важных показателей электрических машин, как электрические потери в сверхпроводящих обмотках и возникающие электродинамические усилия, на примере прототипа полностью сверхпроводящей конструкции униполярного синхронного генератора индукторного типа для кинетического накопителя энергии. Представлены методика и расчетные оценки потерь и электродинамических сил в катушках возбуждения и обмотках статора при допустимых для сверхпроводников токах. Методика расчета основана на апробированной модели свойств ВТСП материала, описывающей изменение удельного электрического сопротивления вблизи критического состояния, где теряется сверхпроводимость и возникают электрические потери.

**Ключевые слова:** электрический генератор, обмотки из ВТСП лент, электрические потери, электродинамические усилия, методика расчета.

When solving problems arising in the design of superconducting electrical machines, they face difficulties in modeling electromagnetic processes due to complex nonlinear dependencies of the critical parameters of high-temperature superconducting (HTS) tapes on magnetic induction,

temperature and current flow. The article discusses possible approaches to determining such important indicators of electric machines as electrical losses in superconducting windings and the resulting electrodynamic forces, using the example of a prototype of a fully superconducting design of a unipolar synchronous generator of the inductor type for a kinetic energy storage. The methodology and calculated estimates of losses and electrodynamic forces in the excitation coils and stator windings at permissible currents for superconductors are presented. The calculation method is based on a proven model of the properties of the HTS material, which describes the change in the electrical resistivity near the critical state, where superconductivity is lost and electrical losses occur.

**Key words:** electric generator, windings from HTSP tapes, electrical losses, electrodynamic forces, calculation method.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 51-59*

### **Сравнительный анализ трёхуровневого автономного инвертора и автономного инвертора с трансформатором с вращающимся магнитным полем в аварийных режимах**

ДМИТРИЕВ Б.Ф., ЧЕРЕВКО А.И., КУЗЬМИН И.Ю.

Приведены результаты сравнительного анализа эффективности работы в аварийных режимах автономного инвертора (АИ) с трансформатором с вращающимся магнитным полем (ТВМП) и трёхуровневого инвертора, выполненного по классической топологии с фиксированной нейтральной точкой, при отказе силовых вентилях в их полупроводниковых коммутаторах. Разработаны математические модели АИ с ТВМП и трёхуровневого АИ в программной среде MATLAB Simulink и исследована их работа на активную, активно-индуктивную нагрузки, а также на асинхронный электродвигатель. Рассмотрены возможные варианты отказа (обрыва) одного силового вентиля для трёхуровневого АИ и двух вентилях для АИ с ТВМП. Установлено, что большее число силовых вентилях, используемое в АИ с ТВМП, делает такую схмотехническую топологию инвертирования более надёжной при отказах этих вентилях благодаря возможности системы управления переходить на резервный алгоритм.

**Ключевые слова:** автономный инвертор, трёхуровневый инвертор, трансформатор с вращающимся магнитным полем, аварийный режим, коэффициент гармоник; коэффициент несимметрии по обратной последовательности.

The results of a comparative analysis of the efficiency of operation in emergency modes of an autonomous inverter (AI) with a transformer with a rotating magnetic field (TRMF) and a three-level inverter, made according to the classical topology with a fixed neutral point, when the power valves in their semiconductor switches fail. Mathematical models of AI with TRMF and three-level AI in the MATLAB Simulink software environment are developed and their operation on active, active-inductive loads, as well as on an asynchronous electric motor is investigated. Possible variants of failure (breakage) of one power valve for a three-level AI and two valves for an AI with a TRMF are considered. It is established that the greater number of power valves used in the AI with TRMF makes such a circuit topology of inverting more reliable in the event of failures of these valves due to the ability of the control system to switch to a backup algorithm.

**Key words:** autonomous inverter, three-level inverter, transformer with rotating magnetic field, emergency mode, harmonic coefficient; inverse sequence asymmetry coefficient.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 60-64*

### **Магнитное поле в дугогасительных реакторах с плавным регулированием немагнитного зазора**

БАЯЗИТОВ И.Р., МЕДВЕДЕВ В.Г., ПЕТРОВ Е.М., ПЕТРОВ М.И.

Статья посвящена исследованию магнитного поля в немагнитном зазоре магнитопровода дугогасительного реактора в зависимости от изменения высоты единичных зазоров и стальной вставки. Результаты исследований могут использоваться при определении прямых задач определения индуктивности реакторов в зависимости от габаритных размеров магнитопровода и решении обратных задач.

**Ключевые слова:** дугогасящий реактор, стальной магнитопровод, немагнитные зазоры, выпучивание магнитного поля.

The article is devoted to the study of the magnetic field in the non-magnetic gap of the arc-extinguishing reactor magnetic circuit depending on the change in the height of the individual gaps and the steel insert. The results of the research can be used in determining the direct problems of determining the inductance of reactors depending on the overall dimensions of the magnetic circuit and solving inverse problems.

**Key words:** arc-quenching reactor, steel magnetic core, non-magnetic gaps, buckling of the magnetic field.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 65-67*

### **Принцип и режимы работы динамического стабилизатора напряжения автономных генераторов**

ЗОЛОТОВ И.И., ШЕВЦОВ А.А.

Предложена имитационная модель динамического стабилизатора напряжения для систем автономного электроснабжения, обеспечивающая соответствие выходных параметров этих систем ГОСТ Р 54149-2010. Описано функциональное назначение преобразователей, составляющих устройство. Представлен алгоритм работы устройства, а также описаны режимы работы ключевых элементов блоков преобразователей, составляющих динамический стабилизатор напряжения.

**Ключевые слова:** автономный источник электроэнергии, динамический стабилизатор напряжения, качество электроэнергии, фильтрорегулирующее устройство, фильтрокомпенсирующее устройство, активный фильтр.

A simulation model of a dynamic voltage stabilizer for autonomous power supply systems is proposed, which ensures compliance of the output parameters of these systems with GOST R 54149-2010. The functional purpose of the converters that make up the device is described. The algorithm of the device operation is presented, as well as the operating modes of the key elements of the converter blocks that make up the dynamic voltage stabilizer are described.

**Key words:** autonomous power source, dynamic voltage stabilizer, power quality, filter-regulating device, filter-compensating device, active filter.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 68-73*

### **Распознавание поврежденного ответвления при одностороннем наблюдении линии электропередачи**

ЛЯМЕЦ Ю.Я., МАРТЫНОВ М.В., НИКОНОВ И.Ю.

Изложен подход к распознаванию поврежденного ответвления линии электропередачи, особенность которого заключается в измерении отношения напряжения текущего режима к его аварийной составляющей, а также представление этого измерения годографами двух типов. Каждое ответвление характеризуется своим априорным годографом. Его главный

параметр – аргумент внутреннего сопротивления электрической сети как эквивалентного генератора относительно ответвления. Алгоритм распознавания повреждения, реализуемый в процессе наблюдения линии электропередачи, образует две операции, первая из которых – преобразование текущей информации в координатный годограф того же замера; это функция координаты места предполагаемого повреждения. Вторая – определение координат точек пересечения координатного годографа с априорными годографами и выявление той из них, в которой координаты пересекающихся годографов совпадают, что указывает на поврежденное ответвление.

**Ключевые слова:** линия электропередачи, ответвления, короткое замыкание, распознавание.

An approach to the recognition of a damaged branch of a power transmission line is described, the peculiarity of which is to measure the ratio of the current mode voltage to its emergency component, as well as the representation of this measurement by two types of hodographs. Each branch is characterized by its own a priori hodograph. Its main parameter is the argument of the internal resistance of the electrical network as an equivalent generator relative to the branch. The damage recognition algorithm implemented in the process of monitoring the power line forms two operations, the first of which is the transformation of the current information into a coordinate hodograph of the same measurement; this is a function of the coordinates of the place of the alleged damage. The second is to determine the coordinates of the intersection points of the coordinate hodograph with the a priori hodographs and identify the one in which the coordinates of the intersecting hodographs coincide, which indicates a damaged branch.

**Key words:** transmission line, branches, short-circuit, recognition.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 74-80*

### **Расчет коммутаторного индуктивно-конденсаторного генератора**

НОСОВ Г.В., ПУСТЫННИКОВ С.В., КУЛЕШОВА Е.О., НОСОВА М.Г.

Разработана методика расчета коммутаторного индуктивно-конденсаторного генератора, позволяющая определять напряжения, токи, мощность и эффективность генератора с учетом параметров его элементов при частотно-импульсном режиме электропитания активно-индуктивной нагрузки. Достоверность методики подтверждается приближенным

совпадением расчетных и экспериментальных значений напряжений и токов опытной модели генератора. Для повышения эффективности генератора, напряжения на конденсаторе и мощности генерируемых импульсов тока в нагрузке необходимо увеличивать напряжение источника, напряжение включения диристоров, частоту и скважность коммутации, число периодов зарядки конденсатора, постоянную времени индуктивного накопителя и снижать емкость конденсатора. Генератор при напряжении источника до 48 В и частоте импульсов тока в нагрузке 1 Гц может иметь энергию импульса до 12 кДж, среднюю мощность до 12 кВт при эффективности до 0,89 и импульсной мощности до 35 МВт. Возможно подключение генератора к источнику с недостаточным для зарядки конденсатора уровнем постоянного напряжения, когда напряжение на заряжаемом конденсаторе (639–3060 В) может в десятки раз превышать напряжение источника (12–48 В).

**Ключевые слова:** коммутатор, индуктивный накопитель, конденсатор, ток, напряжение.

A method for calculating a commutating inductive-capacitor generator has been developed, which makes it possible to determine the voltages, currents, power and efficiency of the generator taking into account the parameters of its elements in a pulse-frequency mode of power supply of an active-inductive load. To increase the efficiency of the generator, the voltage across the capacitor and the power of the generated current pulses in the load, it is necessary to increase the source voltage, the switching voltage of the diodes, the switching frequency and duty cycle, the number of capacitor charging periods, the time constant of the inductive storage, and reduce the capacitance of the capacitor. A generator with a source voltage of up to 48 V and a current pulse frequency in a load of 1 Hz can have a pulse energy of up to 12 kJ, an average power of up to 12 kW with an efficiency of up to 0.89 and a pulse power of up to 35 MW. It is possible to connect the generator to a source with an insufficient DC voltage level for charging the capacitor, when the voltage across the charged capacitor (639-3060 V) can be tens of times higher than the source voltage (12-48 V).

**Key words:** switch, inductive storage, capacitor, current, voltage.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 81-85*

**Понижающий преобразователь энергетической установки на базе топливных элементов для беспилотного летательного аппарата**

БУРЦЕВ Ю.А., ПАВЛЕНКО А.В., ВАСЮКОВ И.В., ПУЗИН В.С., ЖИВОДЕРНИКОВ А.В.

Рассмотрен понижающий преобразователь напряжения энергетической установки киловаттного класса мощности на базе топливных элементов для беспилотного летательного аппарата. Предложена схема замещения преобразователя, учитывающая электрические процессы в стеке топливных элементов, вихревые токи в проводящих структурах и паразитные индуктивности. Выполнен сравнительный анализ режимов работы преобразователей с различной схмотехникой. Предложена схема понижающего бестрансформаторного трехфазного преобразователя напряжения с общим дросселем на три фазы. Показано, что в отличие от классических схем для предложенной трехфазной схемы преобразователя с одним дросселем индуктивность и масса дросселя могут быть существенно снижены практически без потери качества работы преобразователя, что позволит уменьшить вес и габариты конструкции, снизить потери энергии в дросселе.

**Ключевые слова:** преобразователь напряжения, энергетическая установка, топливный элемент, беспилотный летательный аппарат.

A step-down voltage converter of a kilowatt-class power plant based on fuel cells for an unmanned aerial vehicle is considered. A converter replacement scheme is proposed that takes into account electrical processes in the fuel cell stack, eddy currents in conducting structures, and parasitic inductances. A comparative analysis of the operating modes of converters with different circuitry is performed. A scheme of a step-down transformer-free three-phase voltage converter with a common three-phase choke is proposed. It is shown that, in contrast to the classical schemes for the proposed three-phase converter circuit with one choke, the inductance and mass of the choke can be significantly reduced almost without losing the quality of the converter, which will reduce the weight and dimensions of the structure, reduce the energy loss in the choke.

**Key words:** voltage converter, power plant, fuel cell, unmanned aerial vehicle.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 86-92*

### **Моделирование работы литий-ионных аккумуляторных батарей в системе электроснабжения автономных объектов**

ЧЕРНОВ А.Е., МАЛЕЕВ Р.А., ЗУЕВ С.М., ШВЕЦОВ А.С., КУКСА В.В.

Рассмотрены два варианта моделей литий-ионных аккумуляторных батарей (АБ). Показано, что математическая модель на основе схемы замещения является самой

распространенной, простой для реализации и гибкой с точки зрения масштабирования для моделирования специальных явлений в АБ. Параметры модели являются нестационарными, подверженными старению батареи, вариации от состояния заряда и температуры. Наиболее перспективным направлением совершенствования моделей для нового поколения систем управления являются физические модели, количественно описывающие электрохимические явления. Показано, что одночастичная электрохимическая модель может быть представлена в виде схемы замещения, имеющей сходство с математической моделью.

**Ключевые слова:** литий-ионная аккумуляторная батарея, система контроля и управления, математическая модель, ток и время разряда, массообмен.

This article provides an overview of two variants of lithium – ion battery models. It is shown that the empirical model based on the substitution scheme is the most common, simple to implement and flexible in terms of scaling for modeling special phenomena in AB. The parameters of the model are non-stationary, subject to both the aging process of the battery, and variations on the state of charge and temperature. The most promising direction for improving models for a new generation of battery management systems is physical models that quantitatively describe electrochemical phenomena in a battery. It is shown that a single-particle electrochemical model can be represented as a substitution scheme that is similar to the empirical model.

**Key words:** lithium-ion battery, monitoring and control system, mathematical model, discharge current and time, mass transfer.

*Электротехника, 2021, №10, стр. 93-96*

**Авторы номера**