

Содержание

Электротехника, 2026, №1, стр. 2-10

Расчетный модуль для определения индуктивностей обмоток в САПР электротехнических устройств

ТИХОНОВ А.И., КРАСОВСКИЙ А.Б., СНИТЬКО И.С., РОЗИН В.Е., БОЯКОВА Т.А.

Рассмотрены способы расчета значений индуктивностей обмоток электротехнических устройств без ферромагнитного сердечника. Предложены методики расчета собственных и взаимных индуктивностей обмоток, основанные на аналитическом расчете магнитного поля и учитывающие конструктивные особенности исполнения обмоток. Предложения авторов реализованы в среде MATLAB и могут быть внедрены в САПР электротехнических устройств в виде дополнительного расчетного модуля с возможностью выбора рационального способа расчета для конкретной конструкции обмотки. Приведены результаты апробации разработанных методик и сравнение результатов, полученных с применением каждой из них, с результатами расчета с применением полевых моделей. Результаты работы могут быть использованы при создании цифровых двойников проектируемых устройств для предварительной оценки их основных характеристик в различных режимах работы.

Ключевые слова: электротехнические устройства, обмотки, индуктивность, векторный магнитный потенциал, САПР, расчет.

Methods for calculating the inductance values of the windings of electrical devices without a ferromagnetic core are considered. Methods for calculating the intrinsic and mutual inductors of windings based on the analytical calculation of the magnetic field and taking into account the design features of the windings are proposed. The authors' proposals are implemented in the MATLAB environment and can be implemented in CAD of electrical devices in the form of an additional calculation module with the possibility of choosing a rational calculation method for a specific winding design. The results of testing the developed methods and comparing the results obtained using each of them with the results of calculations using field models are presented. The results of the work can be used to create digital counterparts of the

designed devices for a preliminary assessment of their main characteristics in various operating modes.

Key words: electrical devices, windings, inductance, vector magnetic potential, CAD, calculation.

Электротехника, 2026, №1, стр. 11-20

Аналитический расчёт магнитного поля гидрогенератора с переменным воздушным зазором полюсов в декартовых координатах формата 3D
АФАНАСЬЕВ А.А.

Рассматривается аналитический расчёт магнитного поля явнополюсного синхронного генератора в декартовых координатах формата 3D на основе решения дифференциального уравнения Лапласа в частных производных методом разделения переменных Фурье. Принципиальной особенностью расчёта является обращение к вектору намагничённости активных ферромагнитных элементов генератора, представляемых двойными тригонометрическими рядами с неизвестными постоянными Фурье, периоды которых равны двойным значениям полюсного деления и длины статорного сердечника генератора. Намагниченности ярем, зубцовых слоёв статора и ротора, сам воздушный зазор в геометрическом смысле рассматриваются как параллелепипеды, наложенные друг на друга. На общих границах этих параллелепипедов должны выполняться известные условия магнитного поля: скалярные магнитные потенциалы и нормальные составляющие магнитной индукции не претерпевают скачка (разрыва) и только у магнитных листов обмоток, располагаемых на границах, магнитные потенциалы будут иметь скачок на величину полного тока магнитного листа. Эти условия позволяют получить систему алгебраических уравнений для нахождения постоянных Фурье. Геометрический подход к намагничённости полюсных наконечников ротора позволил создать требуемую виртуальную конфигурацию воздушного зазора для обеспечения распределения магнитной индукции под полюсами, близкого к синусоидальному. Магнитное поле генератора рассчитывается в виде совокупностей двух полей: продольного и поперечного; последнее создается активным током обмотки статора, фиксируя угол нагрузки генератора. Показано, что радиальные вентиляционные каналы шириной 7 мм в статорном сердечнике практически не влияют на распределение магнитной индукции

в воздушном зазоре вдоль длины ротора; это распределение достаточно равномерно.

Ключевые слова: гидрогенератор, магнитное поле, переменный воздушный зазор, декартовы координаты формата 3D, метод разделения переменных, постоянные Фурье, параллелепипеды намагниченности.

An analytical calculation of the magnetic field of a single-pole synchronous generator in 3D Cartesian coordinates based on the solution of the Laplace partial differential equation by the Fourier separation method is considered. A fundamental feature of the calculation is the reference to the magnetization vector of the active ferromagnetic elements of the generator, represented by double trigonometric series with unknown Fourier constants, the periods of which are equal to the double values of the pole division and the length of the stator core of the generator. The magnetization of the pits, the tooth layers of the stator and rotor, and the air gap itself are geometrically considered as parallelepipeds superimposed on each other. At the common boundaries of these parallelepipeds, the known magnetic field conditions must be met: the scalar magnetic potentials and the normal components of magnetic induction do not undergo a jump (break), and only the magnetic sheets of the windings located at the boundaries will have a jump in magnetic potentials by the amount of the total current of the magnetic sheet. These conditions make it possible to obtain a system of algebraic equations for finding the Fourier constants. The geometric approach to the magnetization of the rotor pole tips made it possible to create the required virtual configuration of the air gap to ensure the distribution of magnetic induction under the poles, close to sinusoidal. The magnetic field of the generator is calculated as a combination of two fields: longitudinal and transverse; the latter is created by the active current of the stator winding, fixing the load angle of the generator. It is shown that radial ventilation ducts 7 mm wide in the stator core have practically no effect on the distribution of magnetic induction in the air gap along the length of the rotor; this distribution is fairly uniform.

Key words: hydrogenerator, magnetic field, variable air gap, Cartesian coordinates in 3D format, method of separation of variables, Fourier constants, parallelepipeds of magnetization.

удельной мощности и крутящего момента от выходных параметров

ВАСИЛЬКОВ Н.Д., КАЛИТКА В.С., ИВАНОВ Н.С.

Представлены результаты аналитического исследования базы данных технических характеристик более 300 электродвигателей мощностью от 10 кВт и выше, применимых для силовых установок различных современных транспортных средств, прежде всего авиационных. Собрана и систематизирована информация по ключевым характеристикам, включая мощность, крутящий момент, частоту вращения, эффективность, массу, диаметр, удельные характеристики, тип охлаждения, форм-фактор и комплектацию. Определены наблюдаемые предельные значения различных параметров электродвигателей, получены аналитические зависимости, позволяющие оценить параметры перспективных агрегатов, что актуально при формировании облика перспективных летательных аппаратов и их силовых установок. Кроме того, разработанный оценочный аппарат может применяться при формировании технических заданий заказчиками перспективных образцов техники, имеющей в составе электродвигатели, для обоснования рациональных технических характеристик.

Исследования направлены на выбор оптимальных решений при конструировании авиационных гибридных и полностью электрических силовых установок.

Ключевые слова: электродвигатель, мощность, крутящий момент, частота вращения, эффективность, удельная характеристика.

The results of an analytical study of a database of technical characteristics of more than 300 electric motors with a capacity of 10 kW and above, applicable to power plants of various modern vehicles, primarily aircraft, are presented. Information on key characteristics has been collected and systematized, including power, torque, speed, efficiency, mass, diameter, specific characteristics, cooling type, form factor and configuration. The observed limit values of various parameters of electric motors are determined, analytical dependences are obtained that make it possible to estimate the parameters of promising units, which is important in shaping the appearance of promising aircraft and their power plants. In addition, the developed evaluation apparatus can be used in the formation of technical specifications by customers of promising samples of equipment with electric motors to substantiate rational technical characteristics. The research is aimed at choosing optimal solutions for the design of hybrid and fully electric aircraft power plants.

Key words: electric motor, power, torque, rotational speed, efficiency, specific characteristic.

Электротехника, 2026, №1, стр. 31-39

Жидкостное охлаждение электрических машин с высокой удельной мощностью: сравнительный анализ схем и типов охлаждающей жидкости

ЮШКОВА О.А., ГАРИПОВ И.Р., ВАВИЛОВ В.Е.

В статье рассмотрены системы охлаждения электрических машин радиального и аксиального исполнения с высокой удельной мощностью. Выполнен анализ различных конструкций систем охлаждения, применяемых ведущими мировыми производителями. Проведена оценка влияния типа охлаждающей жидкости на эффективность теплоотвода с помощью CFD-моделирования.

Ключевые слова: электрическая машина, система охлаждения, удельная мощность, хладагент.

The article discusses cooling systems for electric machines with high power density of radial and axial design. An analysis of various designs of cooling systems used by leading world manufacturers is carried out. The influence of the type of coolant on heat removal efficiency was assessed using CFD modeling.

Key words: electric machine, cooling system, specific power, coolant.

Электротехника, 2026, №1, стр. 40-45

Расчет и анализ коэффициента преобразования и характеристик понижающего квази-ШИМ преобразователя постоянного напряжения

ВОРОНИН И.П., ВОРОНИН П.А., БОНДАРЕНКО Д.Н., ЯКОВЛЕВ И.Б.

Выполнен аналитический расчет и анализ четырех основных интервалов работы понижающего квази-ШИМ преобразователя на периоде частоты коммутации.

Определены условия устойчивой работы преобразователя в режиме мягкой коммутации с резонансом тока при включении силового ключа. На основании расчета напряжения на резонансном конденсаторе, усредненного на периоде коммутации, получено аналитическое выражение для коэффициента преобразования постоянного напряжения понижающего преобразователя. Показано, что в общем случае коэффициент преобразования является сложной функцией трех переменных: частоты коммутации, коэффициента регулирования по методу ШИМ и тока нагрузки. При выборе тока

нагрузки в качестве параметра, при постоянной частоте коммутации получено выражение для расчета регулировочных характеристик преобразователя. При выборе в качестве параметра коэффициента регулирования, при постоянной частоте коммутации получена формула для расчета нагрузочных характеристик. Представлены результаты экспериментов, подтверждающие правильность основных теоретических расчетов. Выполнена оценка предельных значений токов и напряжений для ключевых компонентов схемы.

Ключевые слова: понижающий квази-ШИМ преобразователь, резонансный контур, коэффициент преобразования, регулировочная характеристика, внешняя характеристика.

An analytical calculation and analysis of the four main operating intervals of a quasi-PWM step-down converter during the switching frequency period has been performed. The conditions of stable operation of the converter in the soft switching mode with current resonance when the power switch is turned on are determined. Based on the calculation of the voltage across the resonant capacitor averaged over the switching period, an analytical expression for the DC voltage conversion coefficient of the step-down converter is obtained. It is shown that, in the general case, the conversion coefficient is a complex function of three variables: the switching frequency, the PWM control coefficient, and the load current. When selecting the load current as a parameter, at a constant switching frequency, an expression is obtained for calculating the adjustment characteristics of the converter. When selecting the control coefficient as a parameter, at a constant switching frequency, a formula for calculating the load characteristics is obtained. Experimental results confirming the correctness of the basic theoretical calculations are presented. The current and voltage limits for the key components of the circuit are estimated.

Key words: quasi-PWM step-down converter, resonant circuit, conversion coefficient, adjustment characteristic, external characteristic.

Электротехника, 2026, №1, стр. 46-52

Регулятор внешнего контура стабилизации напряжения постоянного тока для электротехнического комплекса передачи постоянного тока с преобразователями

напряжения

ИБРАГИМ М., АЛВАЗА И.

Регуляторы внешнего контура стабилизации напряжения постоянного тока широко используются в электротехнических комплексах многотерминальной системы передачи постоянного тока с преобразователями напряжения. Однако точное управление потоком мощности при таком регуляторе затруднено из-за влияния сопротивления линии постоянного тока. Предложен регулятор внешнего контура стабилизации напряжения постоянного тока, минимизирующий ошибки управления потоком мощности. Для этого в структуру регулятора добавлен дополнительный стабилизатор активной мощности, при котором отклонение потока активной мощности вводится в качестве упреждающей компенсации в регулятор внешнего контура стабилизации напряжения. Минимизирующая ошибка управления потоком мощности достигается путем постоянного регулирования сигнала задания напряжения постоянного тока. Эффективность предложенного регулятора проверена моделированием в программе MATLAB/Simulink. Регулятор позволяет свести к минимуму отклонения потока активной мощности от желаемых сигналов задания, указанных в расписании потока мощности, что повышает надежность электротехнического комплекса.

Ключевые слова: передачи постоянного тока, электротехнический комплекс, регулятор напряжения внешнего контура, отклонение мощности, минимизирующая ошибка, моделирование.

Regulators of the external DC voltage stabilization circuit are widely used in electrical engineering complexes of a multi-terminal DC transmission system with voltage converters. However, precise control of the power flow with such a regulator is difficult due to the influence of DC line resistance. The article proposes a regulator for an external DC voltage stabilization circuit that minimizes power flow control errors. For this purpose, an additional active power stabilizer has been added to the regulator structure, in which the deviation of the active power flow is introduced as a proactive compensation into the regulator of the external voltage stabilization circuit. Minimizing power flow control error is achieved by continuously regulating the DC voltage reference signal. The effectiveness of the proposed regulator has been tested by modeling in the MATLAB/Simulink program. The regulator minimizes deviations of the active power flow from the desired target signals specified in the power flow schedule, which increases the reliability of the electrical complex.

Key words: direct current transmission, electrical engineering complex, external circuit voltage regulator, power deviation, minimizing error, modeling.

Электротехника, 2026, №1, стр. 53-59

Расчет оптимальных параметров регулятора скорости асинхронного двигателя при DTC-управлении

КУЛИНИЧ Ю.М., СТАРОДУБЦЕВ Д.А.

Представлена методика настройки оптимальных параметров регулятора скорости на примере наиболее распространенной системы прямого управления моментом DTC. Разработана имитационная модель системы DTC-управления асинхронным двигателем с включенным в ее структуру регулятором скорости. Преимущества DTC-управления заключаются в обеспечении быстрой реакции электромагнитного момента на валу двигателя за счет прямого изменения магнитного потока статора. Регулятор скорости, выполненный на базе ПИ-регулятора, используется для задания электромагнитного момента двигателя. Представлена структурная схема системы прямого управления моментом, кратко описано назначение основных функциональных блоков. Предложен способ расчета параметров регулятора скорости, настроенного на симметричный оптимум, при котором логарифмическая амплитудно-частотная характеристика желаемой системы управления имеет астатизм второго порядка. Установлено, что при настройке DTC-системы на технический (модульный) оптимум в качестве регулятора скорости можно использовать пропорциональный П-регулятор, обеспечивающий заданный оптимальный аperiodический характер переходного процесса. Представлены результаты имитационного моделирования, полученные при исследовании работоспособности разработанного регулятора. Оценивалась устойчивость DTC-системы к возмущающим воздействиям в виде скачкообразного изменения заданной скорости. Показано, что характер переходного процесса по скорости соответствует симметричному и модульному оптимуму. На основании исследований системы прямого управления моментом с разработанной структурой регулятора скорости доказана эффективность применения предложенной методики расчета его параметров.

Ключевые слова: трехфазный асинхронный двигатель, регулятор скорости, методика расчета регулятора, прямое DTC- управление моментом, симметричный оптимум, имитационное регулирование.

The method of setting the optimal parameters of the speed controller is presented using the example of the most common direct torque control system DTC. A simulation model of the asynchronous motor DTC control system with a speed controller included in its structure has been developed. The advantages of DTC control are to ensure a fast response of the electromagnetic torque on the motor shaft by directly changing the magnetic flux of the stator. A speed controller based on a PI controller is used to set the electromagnetic torque of the motor. A structural diagram of the direct torque control system is presented, and the purpose of the main functional blocks is briefly described. A method is proposed for calculating the parameters of a speed controller tuned to a symmetrical optimum, in which the logarithmic amplitude-frequency response of the desired control system has a second-order astaticism. It is established that when setting the DTC system to a technical (modular) optimum, a proportional P-controller can be used as a speed controller, providing a given optimal aperiodic character of the transient process. The results of simulation modeling obtained during the study of the operability of the developed regulator are presented. The stability of the DTC system to disturbing influences in the form of an abrupt change in the set speed was evaluated. It is shown that the nature of the transient process in terms of speed corresponds to a symmetric and modular optimum. Based on studies of the direct torque control system with the developed structure of the speed controller, the effectiveness of the proposed method for calculating its parameters has been proven.

Key words: three-phase asynchronous motor, speed controller, regulator calculation method, direct DTC torque control, symmetrical optimum, simulation control.

Электротехника, 2026, №1, стр. 60-69

Высокочастотный полупроводниковый источник питания с бестрансформаторной согласующей цепью для индукционного нагрева

КИСЕЛЕВ М.Г., ЦЕРКОВСКИЙ Ю.Б., ФЕДИН М.А., КРЮКОВ К.В., БУЛАТЕНКО М.А.

Рассмотрен высокочастотный источник питания с бестрансформаторной согласующей цепью. Разработана методика расчёта параметров согласующей цепи и параметров, которые необходимо учитывать при выборе основных силовых компонентов цепи – транзисторов инвертора, конденсатора согласующей цепи. Для конкретного случая

нагрузки разработана модель индуктора и выполнен расчёт активного и индуктивного сопротивлений для использования их в модели высокочастотного источника питания. Для исследования источника питания и демонстрации результатов его работы разработана модель на номинальную мощность нагрузки 3 кВт. В модели применены подробные модели карбидокремниевых транзисторов для оценки в них тепловых потерь. Приведены результаты работы модели при изменении параметров нагрузки.

Ключевые слова: индукционный нагрев, источник питания, резонансный инвертор, широтно-импульсное регулирование, T-образный LCL-фильтр, потери в транзисторах.

A high-frequency power supply with a transformer-free matching circuit is considered. A method has been developed for calculating the parameters of the matching circuit and the parameters that must be taken into account when selecting the main power components of the circuit – the transistors of the inverter, the capacitor of the matching circuit. An inductor model has been developed for a specific load case and the active and inductive resistances have been calculated for use in a high-frequency power supply model. To study the power source and demonstrate the results of its operation, a model with a rated load capacity of 3 kW has been developed. The model uses detailed models of silicon carbide transistors to estimate their heat losses. The results of the model's operation when changing load parameters are presented.

Key words: induction heating, power supply, resonant inverter, pulse width control, T-shaped LCL filter, losses in transistors.

Электротехника, 2026, №1, стр. 70-79

Реверсивная ячейка с питанием от токовой петли

АСТАШЕВ М.Г., СЕРЕГИН Д.А., ПАВЛОВА М.С.

Представлены результаты разработки и исследования реверсивной выпрямительной ячейки с питанием от токовой петли для высоковольтных источников промышленных установок электронно-лучевой сварки и систем передачи электроэнергии. Изучены принципы её функционирования в прямом и реверсивном режимах работы, предложены подходы к построению системы управления с отдельной синхронизацией двух независимых генераторов линейно изменяющегося напряжения, причем начало и

окончание импульса управления синхронизируется с первым или вторым генератором в зависимости от направления передачи энергии. Разработана модель в среде MATLAB Simulink, позволившая отработать структуру системы управления и алгоритмы управления ячейкой в статическом и динамическом режимах. Проанализированы переходные процессы при работе на холостом ходу и скачкообразном изменении уставки выходного напряжения, а также работа ячейки под нагрузкой.

Ключевые слова: высоковольтный источник питания, токовая петля, многоячейковый преобразователь, реверсивная ячейка, системы фазового управления, переходные процессы.

The results of the development and research of a reversible rectifier cell powered by a current loop for high-voltage sources of industrial electron beam welding installations and power transmission systems are presented. The principles of its functioning in direct and reverse modes of operation are studied, approaches to building a control system with separate synchronization of two independent linearly varying voltage generators are proposed, with the beginning and end of the control pulse synchronized with the first or second generator, depending on the direction of energy transfer. A model has been developed in the MATLAB Simulink environment, which made it possible to work out the structure of the control system and algorithms for controlling the cell in static and dynamic modes. Transient processes during idling and abrupt changes in the output voltage setpoint, as well as the operation of the cell under load, are analyzed.

Key words: high-voltage power supply, current loop, multicellular converter, reversible cell, phase control systems, transients.

Электротехника, 2026, №1, стр. 80-87

Выбор параметров элементов высоковольтных источников питания с токовой петлей для обеспечения максимума мощности нагрузки

СЕРЕГИН Д.А., ПАВЛОВА М.С., ГОНЧАРОВ А.Л., СЛИВА А.П., БЛОХИНА В.А.

Рассмотрена методика выбора параметров элементов силовой части схемы источника питания с передачей энергии токовой петлей. Получено аналитическое выражение для мощности нагрузки как функции этих параметров. Показано, что отклонение параметров от максимума этой функции вызывает недоиспользование компонентов

источника по мощности. Результаты получены аналитическим путем и подтверждены численным схемотехническим моделированием.

Ключевые слова: высоковольтный источник питания, максимальная мощность, оптимизация.

The method of selecting the parameters of the elements of the power part of the power supply circuit with power transmission by a current loop is considered. An analytical expression for the load power as a function of these parameters is obtained. It is shown that the deviation of the parameters from the maximum of this function causes underutilization of the source components in terms of power. The results were obtained analytically and confirmed by numerical circuit modeling.

Key words: high-voltage power supply, maximum power, optimization.

Электротехника, 2026, №1, стр. 88-89

Авторы номера