

Содержание

Электротехника, 2022, №10, стр. 2-11

Электрические машины с высоким показателем удельной мощности

ИВАНОВ Н.С., ЖУРАВЛЕВ С.В., ХАРЬКИНА О.А., ЗДОРОВА М.В., ШИРОКОВ А.А., АХУНОВ М.Т., СОСОВА Д.Д.

Удельная мощность, определяемая как отношение выходной мощности к общей массе, является одним из общепринятых сравнительных показателей для электрических машин. Учитывая возрастающий интерес к электрическим летательным аппаратам, разработчики стараются продемонстрировать для своих изделий высокое значение этого показателя. В статье приведен обзор проектов электрических машин с высокой удельной мощностью, применение которых является перспективным на летательных аппаратах различной размерности. Рассмотрены проекты Ноттингемского университета, Университета Иллинойса, компаний Siemens, Yasa и других. Приведен анализ их технических и технологических особенностей, подходов к проектированию, изготовлению и испытаниям.

Ключевые слова: электрическая машина, удельная мощность, магнитная система Хальбаха, осевое намагничивание, аэромобильность, HPDM-250, SP260D, YASA P400, YASA 750, EMRAX, Magni350, Magni650.

Specific power, defined as the ratio of output power to total mass, is one of the generally accepted comparative indicators for electrical machines. Given the growing interest in electric aircraft, developers are trying to demonstrate a high value of this indicator for their products. This article provides an overview of the projects of electrical machines with high power density, the use of which is promising on aircraft of various dimensions. The projects of the University of Nottingham, the University of Illinois, Siemens, Yasa and others were considered. An analysis of their technical and technological aspects, approaches to design, manufacture and testing is given.

Key words: electric machine, power density, Halbach magnetic system, axial magnetization, air mobility, HPDM-250, SP260D, YASA P400, YASA 750, EMRAX, Magni350, Magni650.

К анализу магнитоэлектрических вентильных двигателей с целым и дробным числом пазов на полюс и фазу

АФАНАСЬЕВ А.А.

Рассмотрены характеристики магнитоэлектрических вентильных двигателей мощностью 150 кВт с обмотками, имеющими целое и дробное число пазов на полюс и фазу. Показано, что при несинусоидальном возбуждении магнитов ротора возникают пульсации электромагнитных моментов и ЭДС обмоток статора. Эти пульсации имеют место также и при синусоидальном возбуждении ротора, если выбрана дробная обмотка, для которой характерно наличие гармоник МДС низших порядков. Среди рассмотренных вариантов двигателей отдаётся предпочтение двигателю с дробной обмоткой, поскольку у него отсутствуют зубцовые гармоники невысоких порядков.

Ключевые слова: вентильные двигатели, обмотки с целым и дробным числом пазов на полюс и фазу, гармоники МДС обмоток, пульсации электромагнитных моментов и ЭДС обмоток.

The characteristics of magnetoelectric valve motors with a power of 150 kW with windings having an integer and fractional number of slots per pole and phase are considered. It is shown that with non-sinusoidal excitation of the rotor magnets, pulsations of electromagnetic moments and EMF of the stator windings occur. These pulsations also occur during sinusoidal excitation of the rotor, if a fractional winding is selected, which is characterized by the presence of a lower-order harmonic MDS. Among the considered engine options, preference is given to an engine with a fractional winding, since it does not have tooth harmonics of low orders.

Key words: valve motors, windings with integer and fractional number of slots per pole and phase, harmonics of MDS windings, pulsations of electromagnetic moments and EMF windings.

Электроприводная заслонка системы активного управления радиальными зазорами для газотурбинного двигателя летательного аппарата

ВАВИЛОВ В.Е., ЛИСОВИН И.Г., НИКУЛИН Д.А., УРАЗБАХТИН И.И., НУРИЕВА А.М.

Для турбинной системы летательного аппарата предложена электроприводная заслонка, предназначенная для полного перекрытия и дросселирования потока охлаждающего

воздуха в системе управления радиальными зазорами. В состав заслонки входят регулирующий орган (дросселирующее устройство типа заслонка) и электромеханизм. Такая система обеспечивает уменьшение удельного расхода топлива, повышение эффективности работы турбинной системы летательного аппарата в переходных режимах, а также дополнительное повышение надежности и безопасности эксплуатации турбинной системы в режиме работы с полной нагрузкой. В программном комплексе MATLAB Simulink предложена математическая модель электроприводной заслонки, предназначенная для разработки алгоритма управления электроприводом и настройки контроллера привода.

Ключевые слова: летательный аппарат, газотурбинный двигатель, заслонка, электропривод, радиальный зазор, моделирование, экспериментальный образец.

For the turbine system of the aircraft, an electric drive damper is proposed, designed to completely block and throttle the cooling air flow in the radial clearance control system. The valve consists of a regulating body (throttling device of the flap type) and an electromechanism. Such a system provides a reduction in specific fuel consumption, an increase in the efficiency of the turbine system of the aircraft in transient modes, as well as an additional increase in the reliability and safety of the operation of the turbine system in full load mode. In the MATLAB Simulink software package, a mathematical model of the electric damper drive is proposed, designed to develop an algorithm for controlling the electric drive and configuring the drive controller.

Key words: aircraft, gas turbine engine, damper, electric drive, radial clearance, simulation, experimental sample.

Электротехника, 2022, №10, стр. 22-25

Позиционный электропривод с двойной обратной связью для низкопрофильных прецизионных механизмов вертикального перемещения

ГАННЕЛЬ Л.В.

Приведены требования к механизмам вертикального перемещения, предназначенным для высокоточного масштабирования прецизионных механизмов инспекционных и измерительных машин. Рассмотрена структура с двойной обратной связью по положению,

используемая для клиновой конструкции таких механизмов. Выполнен подробный анализ режима поддержания заданной позиции. Приведены результаты исследований метода измерения скорости двигателя, позволяющего существенно улучшить стабильность поддержания заданной позиции.

Ключевые слова: позиционный электропривод, двойная обратная связь, механизм вертикального перемещения.

The requirements for vertical movement mechanisms are given. designed for high-precision scaling of precision mechanisms of inspection and measuring machines. The structure with double position feedback used for the wedge design of such mechanisms is considered. A detailed analysis of the mode of maintaining a given position is performed. The results of studies of the method of measuring the speed of the engine, which allows to significantly improve the stability of maintaining a given position, are presented.

Keywords: positional electric drive, double feedback, vertical movement mechanism.

Электротехника, 2022, №10, стр. 26-34

Управление асинхронным двигателем, минимизирующее кинетическую энергию ЧЕРНИГОВ В.М.

Особенностью городского общественного электротранспорта является быстрый набор и сброс кинетической энергии транспортного средства (ТС) при движении между остановками. В связи с этим на первое место выходят требования по совершенству управляемости ТС и минимизации затрат электроэнергии. Рассмотрено векторное управление асинхронным тяговым двигателем, обеспечивающее совершенную управляемость ТС. Реализация предельно допустимой диаграммы ускорения и замедления ТС минимизирует затраты энергии ТС на разгон до скорости, гарантирующей преодоление расстояния между остановками за требуемое время. Приведены уравнения напряжений статорной и роторной цепи тягового асинхронного двигателя, на основе которых построены регуляторы квадратурных компонент вектора тока. Анализируются зависимости кинетической энергии ТС в функции ускорения и замедления для наиболее распространенных траекторий: «разгон – стабилизация скорости – торможение» и «разгон – выбег с замедлением – торможение». Увеличение ускорения в разгоне минимизирует

максимальное значение скорости разгона, увеличивает время выбега и торможение выполняется с меньшей начальной скорости. Минимизация энергии, затрачиваемой на разгон и рекуперированной при торможении, требуют минимальной емкости, массы и габаритов бортового накопителя электрической энергии. На основе уравнения для моментной составляющей тока асинхронного привода предлагается ПИ регулятор, обеспечивающий апериодическую реакцию по управляющему воздействию.

Ключевые слова: городской электротранспорт, асинхронный двигатель, векторное управление асинхронным приводом, кинетическая энергия, моментная составляющая вектора тока, ток намагничивания, постоянная времени.

A feature of urban public electric transport is the rapid recruitment and discharge of kinetic energy of the vehicle when moving between stops. In this regard, the requirements for the perfection of vehicle controllability and minimization of electricity costs come out in the first place. The vector control of an asynchronous traction motor is considered, providing perfect controllability of the vehicle. The implementation of the maximum permissible acceleration and deceleration diagram of the vehicle minimizes the energy consumption of the vehicle to accelerate to a speed that guarantees overcoming the distance between stops in the required time. The voltage equations of the stator and rotor circuits of the traction asynchronous motor are given, on the basis of which the regulators of the quadrature components of the current vector are constructed. The dependences of the kinetic energy of the vehicle in the acceleration and deceleration function for the most common trajectories are analyzed: «acceleration – speed stabilization – braking» and «acceleration – run-out with deceleration – braking». An increase in acceleration during acceleration minimizes the maximum acceleration speed, increases the run-out time and braking is performed at a lower initial speed. Minimizing the energy spent on acceleration and recovered during braking requires a minimum capacity, weight and dimensions of the onboard electric energy storage. Based on the equation for the torque component of the asynchronous drive current, a PI controller is proposed that provides an aperiodic response to the control action.

Key words: urban electric transport, asynchronous motor, vector control of asynchronous drive, kinetic energy, torque component of the current vector, magnetization current, time constant.

Трехфазные инверторы напряжения с мягкой коммутацией на стороне постоянного тока

ВОРОНИН И.П., ВОРОНИН П.А.

Применение мягкой коммутации на стороне переменного тока в многофазных и многоуровневых преобразователях требует большого количества и активных, и пассивных дополнительных элементов. Это приводит к увеличению массогабаритных параметров устройств и росту их стоимости. Поэтому разработка преобразователей с мягкой коммутацией на стороне постоянного тока, в которых используется одна общая для всех плеч инвертора резонансная цепь, обеспечивающая синхронное переключение нескольких силовых ключей в разных фазах при нулевом напряжении или токе, является актуальной задачей. Такой способ реализуется при управлении преобразователем методом векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В пространственно-векторном представлении нулевой вектор может быть сформирован как при общем замыкании ключей анодной или катодной группы инвертора напряжения, так и с помощью искусственного прерывания тока во входной цепи инвертора. В последнем случае источник входного напряжения соединяется с инвертором через прерыватель тока. Управляемый ключ в прерывателе тока снабжен элементами резонансной цепи и мягко коммутируется без динамических потерь мощности. При выключении ключа прерывателя напряжение во входной цепи автономного инвертора напряжения (АИН) автоматически становится равным нулю, поскольку ток нагрузки инвертора принудительно разряжает выходные емкости на всех элементах ключевого блока. При этом коммутацию векторных состояний в АИН можно также проводить без динамических потерь мощности при нулевых напряжениях на основных ключах инвертора. Рассмотрены алгоритмы мягкой коммутации, при которых управляемый ключ прерывателя тока коммутируется с частотой, равной частоте коммутации силовых ключей АИН, и при удвоенном ее значении.

Ключевые слова: инвертор напряжения, мягкая коммутация, прерыватель тока, векторная ШИМ, нулевое напряжение.

The use of soft switching on the AC side in multiphase and multi-level converters requires a large number of both active and passive additional elements. This leads to an increase in the weight and size parameters of the devices and an increase in their cost. Therefore, the development of converters with soft switching on the DC side, which use one resonant circuit common to all the arms of the inverter, providing synchronous switching of several power

switches in different phases at zero voltage or current, is an urgent task. This method is implemented when controlling the converter by vector pulse width modulation (PWM). In the space-vector representation, the zero vector can be formed both by the general closure of the keys of the anode or cathode group of the voltage inverter, and by artificially interrupting the current in the input circuit of the inverter. In the latter case, the input voltage source is connected to the inverter via a current interrupter. The controlled key in the current interrupter is equipped with elements of a resonant circuit and is gently switched without dynamic power loss. When the breaker key is turned off, the voltage in the input circuit of the autonomous voltage inverter (AVI) automatically becomes zero, since the load current of the inverter forcibly discharges the output capacitances on all elements of the key block. At the same time, the switching of vector states in the AVI can also be carried out without dynamic power losses at zero voltages on the main keys of the inverter. Soft switching algorithms are considered, in which the controlled switch of the current interrupter is switched with a frequency equal to the switching frequency of the AVI power keys, and with its value doubled.

Key words: voltage inverter, soft switching, current interrupter, vector PWM, zero voltage.

Электротехника, 2022, №10, стр. 40-48

Исследование и расчет коммутаторного трансформаторно-конденсаторного импульсного генератора

НОСОВ Г.В., НОСОВА М.Г.

Рассмотрен генератор, предназначенный для частотно-импульсного питания высоковольтных технологических установок. Генератор подключается к внешнему источнику с относительно малыми постоянным напряжением и мощностью. Генератор содержит коммутатор на IGBT-транзисторе и трансформатор как накопитель энергии с «обратно» подключенным к вторичной обмотке диодом и выходным конденсатором. Экспериментально проверена работоспособность модели генератора, получено значительное снижение коммутационных перенапряжений и нежелательных бросков токов, что уменьшает вероятность выхода оборудования генератора из строя. Разработана методика расчета при одноимпульсной зарядке выходного конденсатора, позволяющая определять сопротивления, индуктивности и емкости элементов генератора, его напряжения, токи, мощность и эффективность при активно-индуктивном характере нагрузки. Методика расчета может быть использована при проектировании генераторов

мощностью до 5 кВт и частоте следования импульсов тока до 100 Гц с энергией импульса до 50 Дж. Достоверность методики расчета подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: импульсный генератор, коммутатор, трансформатор, конденсатор, разрядник.

A generator designed for pulse-frequency power supply of high-voltage technological installations is considered. The generator is connected to an external source with a relatively low constant voltage and power. The generator contains a switch on an IGBT transistor and a transformer as an energy storage device with a diode «back» connected to the secondary winding and an output capacitor. The operability of the generator model has been experimentally tested, a significant reduction in switching overvoltages and unwanted surges of currents has been obtained, which reduces the likelihood of generator equipment failure. A calculation method has been developed for single-pulse charging of the output capacitor, which makes it possible to determine the resistances, inductances and capacitances of the generator elements, its voltages, currents, power and efficiency with the active-inductive nature of the load. The calculation method can be used in the design of generators with a power of up to 5 kW and a pulse repetition rate of up to 100 Hz with a pulse energy of up to 50 J. The reliability of the calculation method has been confirmed experimentally.

Key words: pulse generator, switchboard, transformer, capacitor, spark gap.

Электротехника, 2022, №10, стр. 48-57

Двунаправленный понижающе-повышающий преобразователь напряжения для низковольтных систем бесперебойного электроснабжения

МЕНЬШИКОВ Я.А.

Рассмотрен принцип обеспечения бесперебойным питанием низковольтных потребителей постоянного тока, а также техническое устройство, реализующее этот принцип – двунаправленный повышающе-понижающий преобразователь напряжения.

Предложенный принцип и преобразователь позволяют обеспечить резервное питание низковольтных потребителей с минимальными потерями благодаря прямому преобразованию постоянного напряжения резервной батареи в постоянное напряжение питания целевого устройства. Преобразователь предназначен для обеспечения

бесперебойным питанием низковольтных устройств, работающих при напряжении питания от 12 до 48 В постоянного тока. Преобразователь одной своей стороной подключается к линии питания защищаемого устройства, а другой стороной – к резервной аккумуляторной батарее. В штатном режиме часть тока из линии питания целевого устройства отбирается преобразователем и передается в резервную батарею для ее зарядки. Когда сетевое питание отключается, преобразователь осуществляет обратную передачу энергии от батареи в линию питания целевого устройства. Переход на работу от батареи происходит мгновенно, без провалов напряжения. Система бесперебойного питания, построенная на базе представленного преобразователя проста в подключении и настройке, имеет малую стоимость и высокую эффективность. Преобразователь позволяет без лишних затрат добавить резервное питание в том числе в те системы питания постоянного тока, в которых оно изначально не было предусмотрено.

Ключевые слова: источник бесперебойного питания, двунаправленный преобразователь, аккумулятор.

The paper presents the principle of providing uninterrupted power supply to low-voltage DC consumers, as well as a technical device that implements this principle - a bidirectional step-up step-down voltage converter. The proposed principle and the converter make it possible to provide backup power to low-voltage consumers with minimal losses due to direct conversion of the backup battery DC voltage into the target device DC supply voltage. The converter is designed to provide uninterrupted power supply to low-voltage devices operating at a supply voltage of 12 to 48 V DC. One side of the converter is connected to the power supply line of the protected device, and the other side is connected to the backup battery. In normal mode, part of the current from the power line of the target device is taken by the converter and transferred to the backup battery for its charging. When the mains power fails, the converter transfers power from the battery back to the power line of the target device. Switching to battery operation is instantaneous, with no voltage dips. The uninterruptible power supply system built on the basis of the presented converter is easy to connect and configure, has low cost and high efficiency. The converter allows you to add redundant power at no extra cost, including to those DC power systems in which it was not originally provided.

Key words: uninterruptible power supply, bidirectional converter, battery.

Оптимизация геометрии ротора гидрогенератора с дробной однозубцовой обмоткой для ПЭС и малых ГЭС

ПОПОВ И.Л., ТОПОРКОВ Д.М.

Генераторы приливных и малых гидроэлектростанций обычно работают совместно с мультипликатором или преобразователем частоты. Используя дробную однозубцовую обмотку, можно создать генератор для нужд таких электростанций, который бы мог обходиться без мультипликатора и преобразователя частоты. В статье рассмотрены вопросы проектирования полюса ротора явнополюсного генератора с дробной однозубцовой обмоткой для нужд приливных и малых ГЭС. Рассмотрены существующие рекомендации по определению размеров полюса ротора для машин с традиционной обмоткой статора. Путем итеративного моделирования магнитного поля с последующим анализом полученных результатов сформулированы рекомендации по выбору тех же параметров, но для машин с дробной однозубцовой обмоткой.

Ключевые слова: приливные электростанции, малые ГЭС, гидрогенератор, дробная однозубцовая обмотка, полюс ротора.

Generators of tidal and small hydroelectric power stations usually work together with a multiplier or a frequency converter. Using a fractional single-tooth winding, it is possible to create a generator for the needs of such power plants, which could do without a multiplier and a frequency converter. The article discusses the issues of designing the rotor pole of a single-pole generator with a fractional single-tooth winding for the needs of tidal and small hydroelectric power plants. The existing recommendations for determining the size of the rotor pole for machines with traditional stator winding are considered. By iterative modeling of the magnetic field with subsequent analysis of the results obtained, recommendations are formulated for the selection of the same parameters, but for machines with fractional single-tooth winding.

Keywords: tidal power plants, small hydroelectric power plants, hydrogenerator, fractional single-tooth winding, rotor pole.

Электротехника, 2022, №10, стр. 65-65

Геннадий Михайлович Шуев (Некролог)