

Содержание

Электротехника, 2023, №7, стр. 2-8

Анализ вариантов схем обмоток статора асинхронных частотно-регулируемых электродвигателей систем электродвижения

БЕДЕКЕР А.А., ЗАХАРОВ А.В., КАЩЕНКОВ А.В.

Рассмотрены принципы построения статорных обмоток гребных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, используемых в системах электродвижения современных судов ледового класса. Показаны преимущества шестифазной двенадцатизонной статорной обмотки, состоящей из двух групп трехфазных обмоток, имеющей сдвиг 30 эл. градусов. Моделированием на основе метода конечных элементов показано, что применение такой обмотки снижает мощность добавочных потерь холостого хода. Выявлен основной недостаток обмотки, который проявляется при рассогласованности фазового сдвига между двумя трехфазными системами, приводящей к появлению контурного тока, увеличению электрических потерь в обмотке статора и росту добавочных потерь холостого хода. Исследованы особенности работы обмотки при питании от одной трехфазной сети. Полученные результаты проанализированы и соотнесены с экспериментальными данными приемо-сдаточных испытаний электродвигателя ГЭД 2х10000. Рассмотрены особенности схемы обмотки с тремя параллелями, примененной в электродвигателе ГЭД 2х15000. Исследованы аварийные режимы электропитания двигателя с такой схемой обмотки статора.

Ключевые слова: гребные электродвигатели, синхронный двигатель, схемы обмотки статора, моделирование.

The principles of construction of stator windings of rowing asynchronous motors with a short-circuited rotor used in electric propulsion systems of modern ice-class vessels are considered. The advantages of a six-phase twelve-zone stator winding consisting of two groups of three-phase windings having a shift of 30 degrees are shown. Modeling based on the finite element method shows that the use of such a winding reduces the power of additional idle losses. The main drawback of the winding is revealed, which manifests itself when the phase shift mismatch between two three-phase systems leads to the appearance of a loop current, an increase in

electrical losses in the stator winding and an increase in additional no-load losses. The features of the winding operation when powered from a single three-phase network are investigated. The obtained results are analyzed and correlated with experimental data of acceptance tests of the GED 2x10000 electric motor. The features of the winding circuit with three parallels used in the GED 2x15000 electric motor are considered. The emergency modes of the motor power supply with such a stator winding scheme are investigated.

Key words: rowing electric motors, synchronous motor, stator winding circuits, modeling.

Электротехника, 2023, №7, стр.9-14

Снижение магнитных потерь активного электромагнитного подвеса

МАКАРИЧЕВ Ю.А., ИВАННИКОВ Ю.Н.

Рассмотрены пути уменьшения основных потерь активного электромагнитного подшипника – магнитных потерь в пакете ротора, путем изменения геометрии полюсов электромагнитов и уменьшения влияния высших гармонических на кривую магнитной индукции в воздушном зазоре. Рассмотрены две конструкции полюса магнитного подшипника, выполнен их анализ и сравнение силовых и энергетических параметров. При решении поставленных задач использовались методы численного моделирования стационарного и нестационарного магнитных полей в двумерной постановке.

Ключевые слова: активный магнитный подшипник, магнитный подвес, магнитные потери, пространственное перемагничивание, повышение энергоэффективности.

The ways of reducing the main losses of the active electromagnetic bearing – magnetic losses in the rotor package, by changing the geometry of the poles of electromagnets and reducing the influence of higher harmonic on the magnetic induction curve in the air gap are considered. Two magnetic bearing pole designs are considered, their analysis and comparison of power and energy parameters are performed. Methods of numerical simulation of stationary and non-stationary magnetic fields in a two-dimensional formulation were used to solve the tasks.

Key words: active magnetic bearing, magnetic suspension, magnetic losses, spatial magnetization reversal, energy efficiency improvement.

Трёхмерная аналитическая модель сверхминиатюрного магнитоэлектрического вентильного двигателя

АФАНАСЬЕВ А.А.

Рассмотрена аналитическая математическая модель в цилиндрических координатах сверхминиатюрного магнитоэлектрического вентильного двигателя без ферромагнитных сердечников, основанная на решениях краевых задач математической физики методом разделения переменных применительно к трём составным круговым цилиндрам, из которых один сплошной, а два других полые. Показано, что все шесть неизвестных постоянных могут быть определены из условий равенства потенциалов и составляющих магнитных индукций с координатами r и z на двух внутренних общих цилиндрических границах. Выполнен расчёт магнитной индукции внутри цилиндрического постоянного магнита из-за действий его размагничивающего фактора. Определены значения магнитной индукции в воздушном зазоре и зоне расположения проводников обмотки статора при наличии номинального тока в обмотке и без него. Отмечено слабое влияние магнитодвижущей силы обмотки статора на уровень магнитной индукции в немагнитном пространстве. Результаты расчётов подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: сверхминиатюрный магнитоэлектрический вентильный двигатель, магнитодвижущая сила обмотки, трёхмерная модель, метод разделения переменных, цилиндрические функции Бесселя.

An analytical mathematical model in cylindrical coordinates of a superminiature permanent magnet synchronous motor without ferromagnetic cores is considered, based on solutions of boundary value problems of mathematical physics by the method of separation of variables in relation to three composite circular cylinders, of which one is solid and the other two are hollow. It is shown that all six unknown constants can be determined from the conditions of equality of potentials and components of magnetic inductions with coordinates and on two internal common cylindrical boundaries. The magnetic induction inside a cylindrical permanent magnet is calculated due to the actions of its demagnetizing factor. The values of magnetic induction in the air gap and the area of the stator winding conductors are determined in the presence of rated current in the winding and without it. A weak influence of the magnetomotive force of the stator winding on the level of magnetic induction in a non-magnetic space is noted. The calculation

results have been confirmed experimentally.

Key words: superminiature permanent magnet synchronous motor, magnetomotive force of winding, three-dimensional model, method of separation of variables, cylindrical Bessel functions.

Электротехника, 2023, №7, стр.22-29

Алгоритм управления источника питания обмотки горизонтального поля токамака КТМ

КОТОВ С.В., ПАВЛОВ В.М., ЗАРВА Д.Б.

Предложен алгоритм управления источника питания обмотки горизонтального поля токамака КТМ, исключающий возникновение и развитие наиболее опасных сочетаний возможных аварийных ситуаций при испытаниях устройства. Ключевые функции алгоритма – ограничение и контроль максимального тока в обмотке горизонтального поля, а также напряжения на буферной емкости в режиме предварительного заряда. Разработка алгоритма затруднена тем, что на этапе его ввода в эксплуатацию отсутствуют точные данные об объекте управления, а именно, о движении плазмы, что определяет уровень и скорость нарастания компенсирующего воздействия электромагнитных обмоток горизонтально поля токамака, необходимого для удержания плазменного шнура в центре внутренней камеры. Эти характеристики, как правило, получают в результате экспериментов. Комплексные испытания источника питания электромагнитной обмотки горизонтального поля подтвердили обоснованность выбранных решений.

Ключевые слова: токамак, обмотка горизонтального поля, источник питания, алгоритм управления.

An algorithm for controlling the power supply of the horizontal field winding of the KTM tokamak is proposed, which excludes the occurrence and development of the most dangerous combinations of possible emergency situations during testing of the device. The key functions of the algorithm are limiting and controlling the maximum current of the horizontal field winding, as well as the voltage on the buffer tank in the pre-charge mode. The development of the algorithm is complicated by the fact that at the stage of its commissioning there is no accurate data on the control object, namely, on the movement of plasma, which determines the level and rate of increase of the compensating effect of electromagnetic windings horizontally of the tokamak field required to hold the plasma cord in the center of the inner chamber. These

characteristics are usually obtained as a result of experiments. Comprehensive tests of the power supply of the electromagnetic winding of the horizontal field confirmed the validity of the chosen solutions.

Key words: tokamak, horizontal field winding, power supply, control algorithm.

Электротехника, 2023, №7, стр.29-37

Коммутаторный взаимно индуктивно-конденсаторный импульсный генератор НОСОВ Г.В.

Разработан генератор с гальванической связью внешнего источника постоянного напряжения, обмоток повышающего напряжения трансформаторного накопителя энергии и высоковольтного потребителя импульсов тока. Генератор содержит коммутатор на IGBT-транзисторе и два выходных заряжаемых конденсатора, которые при пробоях разрядника периодически разряжаются на высоковольтный потребитель.

Экспериментально подтверждена работоспособность генератора при большем выходном напряжении и большей эффективности по сравнению с коммутаторным трансформаторно-конденсаторным импульсным генератором, особенно при использовании трансформаторного накопителя со сниженным коэффициентом связи обмоток. Методика расчета дает совпадающие с экспериментами результаты и может быть использована при проектировании. Генераторы со средней мощностью до 5 кВт, выходным напряжением до 10 кВ и массой накопителя до 100 кг могут применяться для питания высоковольтных потребителей мощными импульсами тока с частотой следования до 10 Гц при внешнем источнике с относительно малыми значениями постоянного напряжения и мощности, когда для этого источника не требуется исключение гальванической связи с потребителем.

Ключевые слова: коммутатор, трансформатор, накопитель энергии, конденсатор, разрядник, импульс тока.

A generator with galvanic coupling of an external DC voltage source, windings of a voltage-boosting transformer energy storage and a high-voltage consumer of current pulses has been developed. The generator contains a switch on an IGBT transistor and two output charged capacitors, which are periodically discharged to a high-voltage consumer when the spark gap breaks. The operability of the generator with a higher output voltage and greater efficiency compared to a commutator transformer-capacitor pulse generator has been experimentally confirmed, especially when using a transformer storage with a reduced coupling coefficient of

the windings. The calculation method gives results that coincide with the experiments and can be used in the design. Generators with an average power of up to 5 kW, an output voltage of up to 10 kV and a storage mass of up to 100 kg can be used to supply high-voltage consumers with powerful current pulses with a repetition frequency of up to 10 Hz with an external source with relatively small DC voltage and power values, when this source does not require the exclusion of galvanic communication with the consumer.

Key words: switchboard, transformer, energy storage, capacitor, spark gap, current pulse.

Электротехника, 2023, №7, стр.37-45

Тяговый электропривод с минимальными затратами энергии

ЧЕРНИГОВ В.М.

Проблема минимизации затрат электроэнергии на тягу включает две связанные задачи: оптимизацию привода (передаточного отношения трансмиссии, алгоритма управления и характеристик тягового двигателя) и оптимизацию траектории движения транспортного средства в функции ускорения. В статье приведена оценка всех составляющих затрат энергии при условии усреднения ускорения на интервалах разгона, выбега и торможения. Выполнен анализ зависимости изменений кинетической энергии, энергии потерь на перемагничивание и вихревые токи двигателя, энергии потерь в активных сопротивлениях обмоток тягового двигателя, энергии на преодоление сил сопротивления движению в функции ускорения и моментной составляющей вектора тока асинхронного двигателя. Показано, что в области допустимых значений моментной составляющей вектора тока тягового двигателя и допустимого ускорения (замедления), существуют оптимальные значения этих величин, обеспечивающие минимум суммарных затрат энергии на тягу.

Ключевые слова: электрическая тяга, минимизация затрат электроэнергии на тягу, векторное управление асинхронным двигателем, кинетическая энергия, энергия потерь на перемагничивание и вихревые токи, энергия потерь в активных сопротивлениях обмоток тягового двигателя, энергия преодоления сил сопротивления, ускорение и замедление, быстродействующая (моментная) составляющая вектора тока.

The problem of minimizing the cost of electric power for traction includes two related tasks: optimization of the drive (transmission ratio, control algorithm and characteristics of the traction motor) and optimization of the trajectory of the vehicle in the acceleration function. The article provides an assessment of all components of energy costs, provided that acceleration is averaged

at the intervals of acceleration, run-out and braking. The analysis of the dependence of changes in kinetic energy, loss energy for magnetization reversal and eddy currents of the motor, loss energy in the active resistances of the traction motor windings, energy to overcome the forces of resistance to motion in the acceleration function and the torque component of the asynchronous motor current vector. It is shown that in the range of permissible values of the torque component of the traction motor current vector and permissible acceleration (deceleration), there are optimal values of these values that ensure a minimum of total energy consumption for traction.

Key words: electric traction, minimization of electric power costs for traction, vector control of an asynchronous motor, kinetic energy, loss energy for magnetization reversal and eddy currents, loss energy in the active resistances of the traction motor windings, energy of overcoming resistance forces, acceleration and deceleration, high-speed (torque) component of the current vector.

Электротехника, 2023, №7, стр.46-54

Расчет корректирующего звена в системе управления двухмассовыми системами с заданными запасами устойчивости

ЛОВЛИН С.Ю., МАМАТОВ А.Г., ЦВЕТКОВА М.Х., ДЕМИДОВА Г.Л.

Математические модели электромеханических устройств широкого класса представляются в виде двухмассовых систем с упругими связями. Синтез цифровых систем управления такими объектами осложняется появлением задержек, связанных с дискретизацией системы управления и наличием резонансных частот. Известным подходом является введение в регулятор дополнительного динамического звена (фильтра) для демпфирования резонансных частот, однако это снижает запасы устойчивости разрабатываемой системы управления. Кроме того, параметры механической модели могут быть определены неточно или изменяться в процессе эксплуатации устройства. В статье представлена методика расчета параметров корректирующего звена второго порядка, обеспечивающего заданные запасы устойчивости при переменных параметрах механической нагрузки. Приведен численный пример использования методики для системы управления следящего электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами. Методика может применяться для синтеза регуляторов цифровых систем управления электромеханическими устройствами, обеспечивающих устойчивость и робастность системы управления при наличии резонансных частот.

Ключевые слова: электромеханические устройства, двухмассовые системы, системы управления, корректирующее звено, запас устойчивости.

Mathematical models of electromechanical devices of a wide class are presented in the form of a two-mass system with elastic bonds. The synthesis of digital control systems for such objects is complicated by the appearance of delays associated with the sampling of the control system and the presence of resonant frequencies. A well-known approach is to introduce an additional dynamic link (filter) into the regulator to dampen resonant frequencies, but this reduces the stability reserves of the control system being developed. In addition, the parameters of the mechanical model may be determined inaccurately or may change during the operation of the device. The article presents a method for calculating the parameters of a second-order corrective link that provides specified stability reserves with variable parameters of mechanical load. A numerical example of using the technique for a control system of a tracking electric drive with a synchronous motor with permanent magnets is given. The technique can be used to synthesize regulators of digital control systems for electromechanical devices that ensure the stability and robustness of the control system in the presence of resonant frequencies.

Key words: electromechanical devices, two-mass systems, control systems, corrective link, stability margin.

Электротехника, 2023, №7, стр.55-63

Электропривод с векторным управлением на базе гибридного шагового двигателя ПОЛЮЩЕНКОВ И.С.

Предложена микропроцессорная система векторного управления электроприводом с гибридным шаговым двигателем. Осуществлено автоматическое регулирование координат электропривода – электромагнитного момента, скорости вращения и положения, а также решены вспомогательные задачи управления, что примерно соответствует аналогам. С учётом интенсивности вычислительного процесса при векторном управлении обеспечен баланс между значимостью задач управления и вычислительными ресурсами, выделенными для их выполнения. Для увеличения максимальной скорости электропривода выполнению координатных преобразований и формированию фазных напряжений в зависимости от положения ротора выделен наибольший вычислительный ресурс.

Ключевые слова: электропривод, векторное управление, гибридный шаговый двигатель.

A microprocessor system for vector control of an electric drive with a hybrid stepper motor is proposed. Automatic control of the coordinates of the electric drive – the electromagnetic torque,

rotation speed and position - was carried out, and auxiliary control tasks were solved, which approximately corresponds to analogues. Taking into account the intensity of the computational process in vector control, a balance is provided between the significance of management tasks and the computing resources allocated for their implementation. To increase the maximum speed of the electric drive, the greatest computational resource is allocated to the implementation of coordinate transformations and the formation of phase voltages depending on the position of the rotor.

Key words: electric drive, vector control, hybrid stepper motor.

Электротехника, 2023, №7, стр. 64-65

Авторы номера