

Электротехника, 2024, №1, стр. 1-1

Содержание

Электротехника, 2024, №1, стр. 2-9

Основные направления работ концерна «Русэлпром» по разработке и совершенствованию электрических машин и приводов переменного тока

БЕДЕКЕР А.А.

В статье представлены результаты разработок, проведенных объединенным инженерно-конструкторским центром российского электротехнического концерна «Русэлпром» – ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром»». Приведены результаты освоения разработанной продукции производственными подразделениями концерна. Обозначены направления дальнейшего развития в области электромашиностроения, определенные крупным отечественным производителем электрических машин как наиболее значимые.

Ключевые слова: электромашиностроение, общепромышленные двигатели, комплектный электропривод для электротранспорта, судовой электропривод, системы электродвижения.

The article presents the results of the developments carried out by the Joint engineering and design Center of the Russian electrotechnical concern « Ruselprom» – LLC «Ruselprom Engineering Center». The results of the development of the developed products by the production units of the concern are presented. The directions of further development in the field of electrical engineering, identified by a large domestic manufacturer of electric machines as the most significant, are outlined.

Key words: electrical engineering, general industrial engines, complete electric drive for electric vehicles, marine electric drive, electric propulsion systems.

Электротехника, 2024, №1, стр. 3-27

Принципы проектирования высокоэнергoeffективной общепромышленной серии

асинхронных двигателей с максимизацией энергетических и мощностных показателей

КОБЕЛЕВ А.С., МАКАРОВ Л.Н.

Перечислены инвариантные показатели качества асинхронных машин, общие для большинства технических объектов. Выполнен обзор эволюции серий асинхронных двигателей, при этом периоды эволюции сопоставлены с эрами технических революций в техносфере. Сформулированы принципы проектирования активных частей высокоэнергетически эффективных асинхронных двигателей, сужающие пространство поиска и тем самым облегчающие решение многообъектной многокритериальной задачи оптимизации. На основе расчетного анализа предложены критерии выбора заготовительных диаметров низковольтных асинхронных двигателей средней мощности в зависимости от класса энергоэффективности, числа полюсов, увязки мощности и высоты вращения.

Ключевые слова: серии асинхронных двигателей, конструктивная эволюция техники, энергоэффективность, многообъектная оптимизация, природоподобные технологии.

Invariant quality indicators of asynchronous machines common to most technical objects are listed. An overview of the evolution of asynchronous motor series is performed, while the periods of evolution are compared with the eras of technical revolutions in the technosphere. The principles of designing the active parts of high-energy-efficient asynchronous motors are formulated, narrowing the search space and thereby facilitating the solution of a multi-object multi-criteria optimization problem. Based on the computational analysis, criteria for the selection of blank diameters of low-voltage asynchronous motors of medium power are proposed, depending on the energy efficiency class, the number of poles, the alignment of power and rotation height.

Key words: series of asynchronous motors, constructive evolution of technology, energy efficiency, multi-object optimization, nature-like technologies.

Электротехника, 2024, №1, стр. 28-33

**Перспективы применения новой модификации электродвигателя АНЭ225L4 со
всыпной обмоткой из круглого провода в электроприводах вспомогательных
механизмов электровозов**

БЕДЕКЕР А.А., ЗАХАРОВ А.В., КАЛИНИН В.Ю., КОБЕЛЕВ А.С.

Рассмотрена историческая ретроспектива работ, проводимых концерном Русэлпром в области повышения энергетических и эксплуатационных характеристик электродвигателей АНЭ(М)225L4УХЛ2, используемых в приводах вспомогательных механизмов – вентиляторов и компрессоров электровозов ВЛ80, ВЛ85. Показаны дальнейшие перспективы улучшения энергоэффективности двигателей. Представлены основные результаты разработки электродвигателя со всыпной обмоткой из провода круглого сечения с полиимидной пленочной изоляцией, уложенного в полузакрытые пазы статора.

Ключевые слова: вспомогательные электродвигатели электровоза, добавочные потери, энергоэффективность.

The historical retrospective of the work carried out by Ruselprom concern in the field of improving the energy and operational characteristics of ANE(M)225L4UHL2 electric motors used in the drives of auxiliary mechanisms – fans and compressors of electric locomotives VL80, VL85 is considered. Further prospects for improving the energy efficiency of engines are shown. The main results of the development of electric motors with a loose winding made of round-section wire with polyimide film insulation laid in semi-closed slots of the stator are presented.

Key words: auxiliary electric motors of an electric locomotive, additional losses, energy efficiency.

Электротехника, 2024, №1, стр. 34-40

Расчетная модель асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками для привода измельчителя ядерных отходов

ТИХОНОВА О.В., КУЛАКОВ С.Л., МАЛЫГИН И.В., ПЛАСТУН А.Т.

Рассмотрено построение расчетной цифровой модели асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками (АДКО) для переработки ядерных отходов. На первом этапе работы выполнен анализ перегрузочной способности цифровой расчетной модели АДКО с помощью метода конечных элементов, при этом расчет осуществлен поэтапно, с учетом технологических и физических особенностей конструкции опытного образца АДКО. В модели АДКО учтено влияние оксидной пленки листов сердечника статора, технологических зазоров, вихревых токов и температурных режимов обмоток статора и ротора на перегрузочную способность АДКО. На втором этапе выполнен аналитический расчет механической характеристики АДКО с помощью параметров схемы замещения,

определяемых посредством анализа расчетной модели двигателя в программе Ansys. Выполнено сравнение расчетных механических характеристик АДКО, полученных методом конечных элементов и аналитическим расчетом, с результатами испытаний опытного образца.

Ключевые слова: измельчитель ядерных отходов, асинхронный двигатель, расчетная цифровая модель, схема замещения, механическая характеристика.

The construction of a computational digital model of an asynchronous motor with ring windings (ADCO) for the processing of nuclear waste is considered. At the first stage of the work, the analysis of the overload capacity of the digital calculation model of ADCO was performed using the finite element method, while the calculation was carried out in stages, taking into account the technological and physical design features of the ADCO prototype. The ADCO model takes into account the influence of the oxide film of the stator core sheets, technological gaps, eddy currents and temperature conditions of the stator and rotor windings on the overload capacity of the ADCO. At the second stage, an analytical calculation of the mechanical characteristics of the ADCO was performed using the parameters of the substitution scheme determined by analyzing the design model of the engine in the Ansys program. The calculated mechanical characteristics of ADCO obtained by the finite element method and analytical calculation are compared with the test results of the first prototype.

Key words: nuclear waste shredder, asynchronous motor, computational digital model, substitution scheme, mechanical characteristic.

Электротехника, 2024, №1, стр. 41-49

Быстродействующие модели систем с модульными многоуровневыми преобразователями

ВОРОНЦОВ А.Г., ПРОНИН М.В., СОЛОВЬЕВ А.П., ГЛУШАКОВ В.В., РОЗБИЦКИЙ Г.Г., ДИКУН И.А.

Модульные многоуровневые преобразователи (ММП), построенные на низковольтных полумостовых транзисторно-конденсаторных блоках (ТКБ), позволяют создавать высоковольтные установки без трансформаторов. Такие преобразователи применяются в ветроэлектрических установках, электропередачах, электроприводах. Запасы энергии в ММП распределены между многими ТКБ. Напряжения и токи на входе и выходе ММП имеют малые искажения. Но системы управления ММП сложны, снижение частоты токов на входе или выходе ММП

приводят к увеличению пульсаций напряжений конденсаторов ТКБ. Для ограничения пульсаций в ММП вводятся внутренние контурные токи, в напряжениях управления используются составляющие нулевой последовательности. В статье представлены быстродействующие модели систем с ММП, выполнены исследования, дана оценка эффективности алгоритмов управления инвертором с пассивной нагрузкой, а также электроприводом с ММП и асинхронным двигателем. Предложен трехфазный корректор токов, снижающий их амплитуду, уменьшающий искажения.

Ключевые слова: модульный многоуровневый преобразователь, транзисторно-конденсаторный блок, система управления, модель.

Modular multilevel converters (MMC), built on low-voltage semi-bridge transistor-capacitor blocks (TCB), allow you to create high-voltage installations without transformers. Such converters are used in wind power plants, power transmission, electric drives. The energy reserves in the MMC are distributed among many TCBs. The voltages and currents at the input and output of the MMC have small distortions. But control systems are complex. A decrease in the frequency of currents at the input or output of the MMC leads to an increase in voltage ripples of TCB capacitors. To limit pulsations, internal contour currents are introduced into the MMC, and zero sequence components are used in control devices. The article presents high-speed models of systems with MMC, studies are carried out, and the efficiency of control algorithms for an inverter with a passive load, as well as an electric drive with MMC and an asynchronous motor is evaluated. A three-phase current corrector is proposed, which reduces their amplitude and reduces distortion.

Key words: modular multilevel converter, transistor-capacitor unit, control system, model.

Электротехника, 2024, №1, стр. 50-54

Опыт разработки синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов

ЗАХАРОВ А.В., КОБЕЛЕВ А.С., КУДРЯШОВ С.В., ЖУРАВЛЕВ С.А.

Рассматриваются синхронные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) с конструкцией ротора, при которой магниты встраиваются в прорези сердечника, за счет чего возникает значительная разница магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям. Эти машины находят применение в легком электротранспорте: электро- и гибридных автомобилях, электро- и гибридных автобусах.

В отличие от СДПМ с конструкцией ротора, имеющей магниты, расположенные на поверхности, СДПМ с встроенными магнитами могут обеспечить работу при частотах вращения выше номинальной за счет рационального управления током статора. При этом разработка СДПМ с встроенными постоянными магнитами – задача, связанная с построением и оптимизацией не только конструкции машины, но и выбором компонентов инвертора, настройкой системы управления.

Ключевые слова: тяговый электропривод транспортных средств, синхронный двигатель с постоянными магнитами, синхронный двигатель с встроенными постоянными магнитами, системы управления.

Synchronous electric motors with excitation from permanent magnets (SMPM) with a rotor design in which the magnets are embedded in the slots of the core, due to which there is a significant difference in magnetic conductivities along the longitudinal and transverse axes. These machines are used in light electric vehicles: electric and hybrid cars, electric and hybrid buses. Unlike SMPM with a rotor design having magnets located on the surface, SMPM with built-in magnets can provide operation at rotational speeds above the nominal due to rational control of the stator current. At the same time, the development of an SMPM with built-in permanent magnets is a task related to the construction and optimization of not only the design of the machine, but also the choice of inverter components, control system settings.

Key words: traction electric drive of vehicles, synchronous motor with permanent magnets, synchronous motor with built-in permanent magnets, control systems.

Электротехника, 2024, №1, стр. 55-65

Особенности работы асинхронных двигателей с совмещённой обмоткой в частотно-регулируемом электроприводе

КАЗАКОВ Ю.Б., КРАВАЛЕ И.А., КИСЕЛЕВ М.А., НОВИКОВ И.А., ЗАХАРОВ А.В.

Возрастание потерь, электромагнитного шума асинхронных двигателей и волновых перенапряжений при работе двигателя от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения из-за высших временных гармоник напряжения и тока в определенной степени можно компенсировать применением совмещенных обмоток, которые обеспечивают снижение дифференциального рассеяния, индуктивного сопротивления, ослабление волновых перенапряжений, дополнительных потерь и электромагнитного шума от высших пространственных гармоник магнитного поля. Применение совмещенной обмотки с увеличенным в два раза числом параллельных

структур при параллельном соединении обмоток «звезда» и «треугольник» в частотно-регулируемых асинхронных двигателях позволяет применить более тонкие провода, уменьшить дополнительные потери и вытеснение тока высшими временными гармониками тока. Параметры совмещенных обмоток необходимо выбирать на основе уточненного анализа электромагнитных процессов из-за возможности возникновения уравнительных токов в контурах между фазами разных обмоток. Предложен алгоритм взаимодействия связанных цепной электромеханической и полевой электромагнитной моделей, позволяющий проводить уточненное моделирование работы асинхронных двигателей с совмещенными обмотками от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения. При последовательном соединении схем «звезда» и «треугольник» в совмещенной обмотке по сравнению с трехфазной обмоткой изменяются схема прохождения импульсов напряжения, начальные и конечные распределения напряжения импульса по виткам, улучшаются потенциальные условия работы обмотки.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, совмещенная обмотка, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция напряжения, электромагнитные процессы, электромеханическая модель, дополнительные потери, перенапряжения.

The increase in losses, electromagnetic noise of asynchronous motors and wave shifts during the operation of the motor from a frequency converter with pulse-width voltage modulus due to higher time harmonics of voltage and current in a certain degree can be compensated by the use of combined windings, which reduce differential scattering, inductive resistance, and attenuation of wave overvoltages, additional losses and electromagnetic noise from higher spatial harmonics of the magnetic field. The use of a combined winding with a doubled number of parallel structures with parallel connection of the «star» and «triangle» windings in frequency-controlled asynchronous motors makes it possible to use thinner wires, reduce additional losses and displacement of current by higher time harmonics of current. The parameters of the combined windings must be selected on the basis of a refined analysis of electromagnetic processes due to the possibility of equalizing currents in the circuits between the phases of different windings. An algorithm for the interaction of coupled circuit electromechanical and field electromagnetic models is proposed, which allows for an updated simulation of the operation of asynchronous motors with combined windings from a frequency converter with pulse-width voltage modulation. When the «star» and «triangle» circuits are connected in series in a combined winding, compared with a three-phase winding, the voltage pulse transmission scheme, the initial and final voltage distributions of the pulse along the turns change, and the potential operating

conditions of the winding improve.

Key words: asynchronous motor, combined winding, frequency converter, pulse-width voltage modulation, electromagnetic processes, electromechanical model, additional losses, overvoltage.

Электротехника, 2024, №1, стр. 66-73

Особенности электромагнитных процессов и силовых взаимодействий в турбогенераторах при потреблении реактивной мощности

КУРБАТОВА Е.П., ДЕРГАЧЕВ П.А., КОСТЕНКО А.А., КУРБАТОВ П.А., ЛЕНЁВ С.Н., ОХЛОПКОВ А.В.

Предложена трехмерная модель турбогенератора, позволяющая анализировать его магнитное состояние в различных режимах работы, в том числе с потреблением реактивной мощности. С этой целью применено программное обеспечение EasyMAG3D, базирующееся на пространственных интегральных уравнениях, позволившее благодаря применению параллельных процессов вычислений выполнить расчет магнитного поля в полной трехмерной постановке. Проведены исследования основных негативных явлений, возникающих в режиме потребления реактивной мощности и влияющих на состояние турбогенератора, а именно – насыщения сердечников статора и ротора, возрастания осевой компоненты магнитной индукции в торцевой зоне статора, приводящее к увеличению потерь и повышенному нагреву, а также изменения электромагнитных сил, возникающих в лобовых частях обмотки статора. Сделаны выводы о наиболее значимых факторах, ухудшающих условия работы турбогенераторов при потреблении реактивной мощности.

Ключевые слова: турбогенераторы, режим потребления реактивной мощности, электромагнитные процессы, силовые взаимодействия, моделирование.

A three-dimensional model of a turbogenerator is proposed, which allows analyzing its magnetic state in various operating modes, including with reactive power consumption. For this purpose, the EasyMAG3D software based on spatial integral equations was used, which made it possible, thanks to the use of parallel computing processes, to calculate the magnetic field in a full three-dimensional formulation. Studies of the main negative phenomena that occur in the mode of reactive power consumption and affect the state of the turbo generator, namely, saturation of the stator and rotor cores, an increase in the axial component of magnetic induction in the end zone of the stator, leading to increased losses and increased heating, as well as changes in electromagnetic forces occurring in the frontal parts of the stator winding. Conclusions are

drawn about the most significant factors that worsen the working conditions of turbogenerators when consuming reactive power.

Key words: turbogenerators, reactive power consumption mode, electromagnetic processes, force interactions, modeling.

Электротехника, 2024, №1, стр. 74-79

Аналитическая модель дискового магнитоэлектрического вентильного двигателя на основе трёхмерного метода разделения переменных Фурье

АФАНАСЬЕВ А.А., МАЛИНИН А.И.

На основе уравнений математической физики, являющихся решением трехмерного уравнения Лапласа для полого цилиндра, представлена аналитическая модель вентильного дискового магнитоэлектрического двигателя с двумя аксиальными воздушными зазорами, полученная на основе метода разделения переменных Фурье. Неизвестные постоянные этого метода находятся с помощью четырёх известных граничных условий электромагнитного поля на общих торцевых поверхностях полых цилиндров: скалярные магнитные потенциалы и три координатные составляющие магнитной индукции не претерпевают скачка (разрыва). Если же магнитные листы обмоток по соображениям удобства расчёта располагаются на этих границах, то магнитные потенциалы на них будут иметь скачок, равный полному току магнитного листа. Получены кривые распределения магнитных индукций в воздушных зазорах и значения электромагнитного момента двигателя, которые сопоставляются с данными численного расчёта с помощью программы Ansys Maxwell. Хорошая сходимость полученных результатов указывают на достоверность предложенной аналитической модели вентильного двигателя дискового типа.

Ключевые слова: дисковые двигатели, аналитическая модель, метод разделения переменных Фурье, граничные условия, расчёт.

Based on the equations of mathematical physics, which are the solution of the three-dimensional Laplace equation for a hollow cylinder, an analytical model of a valve disk magnetoelectric motor with two axial air gaps, obtained on the basis of the Fourier variable separation method, is presented. Unknown constants of this method are found using four known boundary conditions of the electromagnetic field on the common end surfaces of hollow cylinders: scalar magnetic potentials and three coordinate components of magnetic induction do not undergo a jump

(rupture). If, for reasons of convenience of calculation, the magnetic sheets of the windings are located at these boundaries, then the magnetic potentials on them will have a jump equal to the total current of the magnetic sheet. The distribution curves of magnetic inductions in the air gaps and the values of the electromagnetic torque of the engine are obtained, which are compared with the numerical calculation data using the Ansys Maxwell program. The good convergence of the results obtained indicate the reliability of the proposed analytical model of a disk-type valve motor.

Key words: disk motors, analytical model, method of separation of Fourier variables, boundary conditions, calculation.

Электротехника, 2024, №1, стр. 80-86

Синтез имитационной модели связанных катушек в системе беспроводной зарядки электрического транспорта

ЗОЛОТАРЕВ А.В., ДЕМИДОВА Г.В., ЦЫРИНОВА А.С., ТЕРЕНТЬЕВА П.В., БАРАНОВ Г.Д., ЧАТТЕРДЖИ С.

Системы беспроводной передачи энергии, основанные на принципе магнитной индукции, являются перспективной технологией проектирования зарядных устройств. Приведено математическое описание процесса беспроводной передачи энергии, соответствующего стандарту IEC 61980. Для изучения электромагнитных свойств системы беспроводной передачи энергии разработана конечно-элементная модель системы, позволяющая оценивать значения собственной и взаимной индуктивности при работе на различных частотах. Полученные при моделировании параметры использованы для построения системы дифференциальных уравнений, описывающих систему связанных катушек на основе теории цепей. На базе этих уравнений получена передаточная функция катушек, позволяющая оценивать их частотные, энергетические и динамические свойства.

Ключевые слова: электромобили, станции беспроводной передачи энергии, связанные катушки, передаточные функции, математическое моделирование.

Wireless power transmission systems based on the principle of magnetic induction are a promising technology for designing chargers. A mathematical description of the wireless power transmission process corresponding to the IEC 61980 standard is given. To study the electromagnetic properties of a wireless power transmission system, a finite element model of the system has been developed that allows estimating the values of intrinsic and mutual

inductance when operating at different frequencies. The parameters obtained in the simulation are used to construct a system of differential equations describing a system of coupled coils based on circuit theory. On the basis of these equations, the transfer function of the coils is obtained, which makes it possible to evaluate their frequency, energy and dynamic properties.

Key words: electric vehicles, wireless power transmission stations, coupled coils, transfer functions, mathematical modeling.

Электротехника, 2024, №1, стр. 87-92

Разработка модуля магнитной отклоняющей системы технологической электронной пушки

ГОНЧАРОВ А.Л., ЩЕРБАКОВ А.В., КОЖЕЧЕНКО А.С., ГАПОНОВА Д.А., РОДЯКИНА Р.В., СЕВРЮКОВ А.П.

Предложена комплексная методика проектирования магнитной отклоняющей системы для технологической электронной пушки. Обоснована целесообразность применения отклоняющих систем с внутренним магнитопроводом и тороидально намотанными секциями катушек для формирования отклоняющих полей, обеспечивающих поворот луча по азимуту с постоянным углом отклонения от вертикальной оси. Показана перспективность применения компьютерного моделирования как на этапе расчета отклоняющего поля и смещения луча, так и на этапе создания конструкции каркаса системы для его последующего изготовления на основе 3D-печати. Определены основные параметры катушек и разработана принципиальная электрическая схема стабилизатора тока с внешним управлением от цифроаналогового преобразователя. Приведены зависимости, показывающие связь между управляющими сигналами и углами отклонения в разработанном прототипе модуля. Показано, что предлагаемая методика является универсальной и может быть применена для создания электронно-оптических элементов пушек, обеспечивающих отклонение, развертку, параллельный перенос или юстировку технологических электронных пучков.

Ключевые слова: электронный пучок, электронная пушка, отклоняющая катушка, трехмерная печать, моделирование.

A comprehensive method of designing a magnetic deflecting system for a technological electron gun is proposed. The expediency of using deflecting systems with an internal magnetic core and toroidally wound sections of coils to form deflecting fields that ensure the rotation of the beam in azimuth with a constant angle of deviation from the vertical axis is substantiated. The prospects

of using computer modeling are shown both at the stage of calculating the deflecting field and beam displacement, and at the stage of creating the structure of the frame of the system for its subsequent manufacture based on 3D printing. The main parameters of the coils are determined and a schematic diagram of a current stabilizer with external control from a digital-to-analog converter is developed. Dependencies are shown showing the relationship between the control signals and the deviation angles in the developed prototype of the module. It is shown that the proposed technique is universal and can be applied to create electron-optical elements of guns that provide deflection, sweep, parallel transfer or alignment of technological electron beams.

Key words: electron beam, electron gun, deflecting coil, three-dimensional printing, modeling.

Электротехника, 2024, №1, стр. 93-95

Авторы номера