

Содержание

Электротехника, 2025, №3, стр. 2-6

Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного тела по его размагничивающему фактору и магнитным параметрам материала

САНДОМИРСКИЙ С.Г.

Предложено аналитическое описание безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного тела. Зависимость получена с использованием коэффициента размагничивания тела, который может быть рассчитан по его форме, и предложенной ранее формулы для описания безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по его коэрцитивной силе, намагниченности технического насыщения и остаточной намагниченности. Эти магнитные параметры могут быть измерены по стандартным методикам с минимальной, по сравнению с другими магнитными параметрами материала, относительной погрешностью. Полученная зависимость использована для анализа влияния относительной длины цилиндрических сердечников из разных магнитомягких материалов на их безгистерезисные кривые намагничивания. Установлены комбинации параметров ферромагнитного тела, зависящие от его размагничивающего фактора и магнитных свойств и определяющие изменение намагниченности на безгистерезисной кривой намагничивания тела.

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, магнитные свойства, безгистерезисное намагничивание, коэрцитивная сила, намагниченность технического насыщения, остаточная намагниченность, ферромагнитное тело.

An analytical description of the hysteresis-free magnetization curve of a ferromagnetic body is proposed. The dependence was obtained using the demagnetization coefficient of the body, which can be calculated from its shape, and the previously proposed formula for describing the hysteresis-free magnetization curve of a ferromagnetic material by its coercive force, magnetization of technical saturation and residual magnetization. These magnetic parameters can be measured using standard methods with a minimum relative error compared to other magnetic parameters of the material. The obtained dependence is used to analyze the effect of the relative length of cylindrical cores made of different soft magnetic materials on their

hysteresis-free magnetization curves. Combinations of parameters of a ferromagnetic body have been established, depending on its demagnetizing factor and magnetic properties and determining the change in magnetization on the hysteresis-free magnetization curve of the body.

Key words: ferromagnetic materials, magnetic properties, hysteresis-free magnetization, coercive force, magnetization of technical saturation, residual magnetization, ferromagnetic body.

Электротехника, 2025, №3, стр. 7-18

Максимизация электромеханических показателей асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в фиксированном объеме активных частей
КОБЕЛЕВ А.С.

Перечислены существующие подходы к построению зависимостей ключевых технико-экономических показателей асинхронных машин от их главных размеров. Предложен подход, опирающийся на серию оптимизационных расчетов энергоэффективных асинхронных машин внутри рациональных диапазонов изменения главных размеров. Полученные данные сопоставлены с соответствующими показателями из классических руководств по проектированию. Даны рекомендации по практическому использованию полученных результатов при проектировании серий энергоэффективных асинхронных двигателей.

Ключевые слова: серии асинхронных двигателей, поисковое проектирование; энергоэффективность, многообъектная оптимизация.

The existing approaches to building dependencies of key technical and economic indicators of asynchronous machines on their main dimensions are listed. An approach based on a series of optimization calculations of energy-efficient asynchronous machines within rational ranges of principal size variation is proposed. The data obtained is compared with the corresponding indicators from classical design manuals. Recommendations are given on the practical use of the results obtained in the design of a series of energy-efficient asynchronous motors.

Key words: asynchronous motor series, exploratory design; energy efficiency, multi-object optimization.

Диагностика технического состояния синхронного генератора по внешнему магнитному полю

БАЛОВНЕВ Д.И.

Среди различных методов диагностики технического состояния синхронных генераторов перспективной представляется бесконтактная диагностика с оценкой стадии развития дефектов без вывода электроустановок из эксплуатации, подключения датчиков и измерительных приборов для оценки технического состояния, вмешательства в конструкцию синхронных генераторов. Рассмотрен метод выявления внутренних дефектов синхронного генератора на основе анализа изменений в распределении внешнего магнитного поля, возникающего при его работе. Модельный эксперимент показал, что при наличии неисправностей изменяются амплитуда и спектр поля. На основе компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов проведена идентификация электрических и механических дефектов путем анализа внешнего магнитного поля синхронного генератора. Определены диагностические признаки дефектов в обмотках статора и возбуждения, статического эксцентриситета индуктора, а также показана степень развития этих дефектов. Метод может быть использован для диагностики технического состояния не только синхронных генераторов, но и электрических машин других типов.

Ключевые слова: синхронные генераторы, техническое состояние, диагностика, внешнее магнитное поле, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

Among the various methods of diagnosing the technical condition of synchronous generators, contactless diagnostics with an assessment of the stage of defect development without decommissioning electrical installations, connecting sensors and measuring devices to assess the technical condition, and interfering with the design of synchronous generators seems promising. A method for detecting internal defects of a synchronous generator is considered based on the analysis of changes in the distribution of the external magnetic field that occurs during its operation. The model experiment showed that in the presence of faults, the amplitude and spectrum of the field change. On the basis of computer modeling using the finite element method, the identification of electrical and mechanical defects was carried out by analyzing the external magnetic field of a synchronous generator. Diagnostic signs of

defects in the stator and excitation windings, static eccentricity of the inductor are determined, and the degree of development of these defects is shown. The method can be used to diagnose the technical condition of not only synchronous generators, but also electric machines of other types.

Key words: synchronous generators, technical condition, diagnostics, external magnetic field, computer modeling, finite element method.

Электротехника, 2025, №3, стр. 24-31

Электрическая машина, интегрированная на вал компрессора высокого давления газотурбинного двигателя

ЖАРКОВ Е.О., ПОДГУЗОВ А.А.

Интеграция электрической машины на вал компрессора высокого давления газотурбинного двигателя является перспективным направлением развития авиационной техники и позволяет повысить эффективность и надежность двигателя, а также расширить его функциональные возможности. Выбор оптимальной конструкции электрической машины для этой цели зависит от конкретных требований и условий эксплуатации. В статье рассмотрены обоснование выбора конструкции, особенности проектирования и разработки интегрируемой электрической машины, работающей в режиме стартера и генератора. Выделены ключевые технологии: активное выпрямление, прессованные катушки, магнитная система Хальбаха, сегментный магнитопровод, которые позволяют получить минимальную массу.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, электрическая машина, компрессор высокого давления, активное выпрямление, прессованные катушки, магнитная система Хальбаха, сегментный магнитопровод.

The integration of an electric machine onto the shaft of a high-pressure compressor of a gas turbine engine is a promising direction for the development of aviation technology and allows to increase the efficiency and reliability of engine, as well as expand its functionality. The choice of the optimal design of an electric machine for this purpose depends on the specific requirements and operating conditions. The article considers the rationale for the choice of design, design features and development of an integrated electric machine operating in starter and generator mode. The key technologies are highlighted: active rectification, pressed coils,

Halbach magnetic system, segmented magnetic circuit, which allow to obtain a minimum mass.

Key words: gas turbine engine, electric machine, high-pressure compressor, active rectification, pressed coils, Halbach magnetic system, segmented magnetic circuit.

Электротехника, 2025, №3, стр. 32-40

Исследование электропривода гибридно-электрических силовых установок параллельной схемы

ГАРИПОВ И.Р., ЮШКОВА О.А.

Рассмотрен подход к реализации электропривода гибридных силовых установок (ГСУ) параллельной схемы. Сопоставлены характеристики ГСУ с приводом турбокомпрессора и свободной турбины. Ключевым различием между рассматриваемыми комплексами является зона размещения электрической машины (ЭМ): в первом случае ЭМ осуществляет привод секции компрессора, во втором – вал свободной турбины. Выполнен поиск оптимальной степени гибридизации – соотношения между электрической и тепловой энергией с учетом параметров системы терморегулирования. Диапазон варьирования степени гибридизации составляет от 5 до 25 %. Анализ результатов показал, что гибридизация летательных аппаратов (ЛА) значительно снижает расход топлива за полетный цикл. Точка безубыточности для схемы с приводом турбокомпрессора соответствует степени гибридизации 18 %, для схемы с приводом свободной турбины это значение составляет 20 %. Схема ГСУ с приводом турбокомпрессора при максимальном рассмотренном значении степени гибридизации (25%) обеспечивает снижение расхода топлива за полетный цикл на 13%. Параллельная гибридная система с приводом свободной турбины снижает расход топлива на 5%. Увеличение степени гибридизации требует увеличения энергии, запасаемой на борту ЛА, что, в свою очередь, требует высокой удельной энергоемкости аккумуляторных батарей (до 600 Вт·ч/кг) и удельной мощности электропривода (более 10 кВт/кг)

Ключевые слова: гибридно-электрическая силовая установка, гибридный газотурбинный двигатель, электрифицированный турбокомпрессор, электрифицированный компрессор, электрическая машина, электротехнический комплекс, аккумуляторные батареи, система охлаждения, степень гибридизации.

An approach to the implementation of an electric drive of hybrid power plants (HPP) of a parallel circuit is considered. The characteristics of the HPP with a turbocharger drive and a free turbine are compared. The key difference between the considered complexes is the zone of placement of the electric machine (EM): in the first case, the EM drives the compressor section, in the second – the shaft of the free turbine. The search for the optimal degree of hybridization is performed – the ratio between electric and thermal energy, taking into account the parameters of the thermal control system. The range of variation in the degree of hybridization is from 5 to 25%. The analysis of the results showed that the hybridization of aircraft significantly reduces fuel consumption during the flight cycle. The break-even point for a turbocharger-driven circuit corresponds to a degree of hybridization of 18%, for a free turbine-driven circuit this value is 20%. The HPP circuit with a turbocharger drive at the maximum considered value of the degree of hybridization (25%) provides a 13% reduction in fuel consumption per flight cycle. A parallel hybrid system with a free turbine drive reduces fuel consumption by 5%. An increase in the degree of hybridization requires an increase in the energy stored on board the aircraft, which, in turn, requires a high specific energy consumption of batteries (up to 600 Wh / kg) and a specific power of the electric drive (more than 10 kW / kg).

Key words: hybrid-electric power plant, hybrid gas turbine engine, electrified turbocharger, electrified compressor, electric machine, electrical complex, batteries, cooling system, degree of hybridization.

Электротехника, 2025, №3, стр. 41-47

Антипомпажный регулятор для центробежного компрессора с электроприводом переменного тока

АНОСОВ В.Н., КАВЕШНИКОВ В.М., ОРЕЛ Е.О.

Рассмотрен способ антипомпажной защиты, основанный на регулировании скорости электродвигателя переменного тока, приводящего во вращение центробежный компрессор. Рассмотрены причины возникновения и развития помпажа в центробежных компрессорах. Предложены критерии определения предпомпажного состояния системы и действия, которые следует предпринять для предотвращения

аварии компрессора при изменении внешних условий. Уход от помпажа предложено осуществлять путем снижения скорости двигателя, то есть переходом на нижележащую статическую напорную характеристику. Разработана имитационная модель компрессора с соответствующей системой управления. Для учета свойств газов и особенностей конструкции компрессора выбрана среда моделирования MATLAB Simulink.

Ключевые слова: центробежный компрессор, электропривод переменного тока, помпаж компрессора, имитационная модель, MATLAB Simulink.

A method of anti-surge protection based on speed control of an alternating current electric motor driving a centrifugal compressor is considered. The causes of the occurrence and development of surge in centrifugal compressors are considered. The criteria for determining the pre-discharge state of the system and the actions that should be taken to prevent a compressor accident when external conditions change are proposed. It is proposed to avoid surging by reducing the engine speed, that is, by switching to the underlying static pressure characteristic. A simulation model of a compressor with an appropriate control system has been developed. To take into account the properties of gases and the design features of the compressor, the MATLAB Simulink modeling environment was selected.

Key words: centrifugal compressor, AC electric drive, compressor surge, simulation model, MATLAB Simulink.

Электротехника, 2025, №3, стр. 48-56

Стабилизация напряжения шины постоянного тока с помощью активного выпрямителя напряжения в условиях несимметрии источника питания

АЛЕКСАНДРОВ И.В., СЕВОСТЬЯНОВ Н.А., НОС О.В.

Предложена структура регулятора с автоподстройкой параметров прямого канала контура регулирования напряжения шины постоянного тока, формирующейся с помощью трехфазного активного выпрямителя, который питается от несимметричного трехфазного источника электроэнергии. Структура регулятора позволяет скомпенсировать влияние нестационарного коэффициента передачи объекта управления в прямом канале контура регулирования напряжения, обеспечив тем самым

желаемую реакцию системы на сигналы управления и возмущения. Предлагаемая структура регулятора позволяет считать объект управления в контуре регулирования напряжения стационарным и рассчитывать его параметры, исходя из ранее известных методик синтеза, справедливых для симметричного случая, упрощая тем самым процесс проектирования. Сравнением качества стабилизации напряжения шины постоянного тока с использованием автоподстройки параметров контура регулирования напряжения и без нее на основе имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink было установлено, что предлагаемый регулятор с автоподстройкой позволяет значительно снизить уровень пульсационной составляющей в напряжении шины постоянного тока, как в установившемся режиме работы системы, так и при динамических изменениях питающего трехфазного напряжения. Также установлено, что обеспечение заданной амплитуды пульсационной составляющей в напряжении шины постоянного тока возможно при значительно меньшей емкости звена постоянного тока активного выпрямителя.

Ключевые слова: активный выпрямитель, ПИ-регулятор, автоподстройка, несимметрия источника питания, шина постоянного тока.

The structure of the regulator with automatic adjustment of the parameters of the direct channel of the DC bus voltage control circuit, formed using a three-phase active rectifier powered by an asymmetric three-phase power source, is proposed. The structure of the regulator makes it possible to compensate for the influence of the non-stationary transmission coefficient of the control object in the direct channel of the voltage control circuit, thereby ensuring the desired response of the system to control signals and disturbances. The application of the proposed regulator structure makes it possible to consider the control object in the voltage control circuit stationary and calculate its parameters based on previously known synthesis techniques that are valid for the symmetric case, thereby simplifying the design process. Comparing the quality of voltage stabilization of the DC bus using automatic adjustment of the parameters of the voltage control circuit and without it using simulation modeling in the MATLAB Simulink environment, it was found that the proposed regulator with automatic adjustment can significantly reduce the level of the pulsation component in the DC bus voltage, both in steady-state operation of the system and with dynamic changes in the supply voltage three-phase voltage. It has also been found that providing a given amplitude of the pulsation component in the DC bus voltage is possible with a significantly lower capacity

of the DC link of the active rectifier.

Key words: active rectifier, PI controller, auto-tuning, power supply asymmetry, DC bus.

Электротехника, 2025, №3, стр. 57-65

Характеристики коммутаторного взаимно индуктивно-конденсаторного импульсного генератора

НОСОВ Г.В., КУЛЕШОВА Е.О.

Показано, что коммутаторный взаимно индуктивно-конденсаторный импульсный генератор без разрядника или другого высоковольтного коммутатора надежно и с большим ресурсом обеспечивает импульсами тока высоковольтный потребитель, которым может быть, например, магнетрон в частотно- импульсном режиме работы при мощности до 1 кВт и более. Экспериментально получены возрастающие нелинейные регулировочные характеристики для напряжения резистивного потребителя и падающие линейные внешние вольтамперные характеристики для напряжения и тока этого потребителя при увеличении относительной длительности включенного состояния коммутатора (IGBT транзистора) и при увеличении тока потребителя. Разработана методика расчета регулировочных и внешних характеристик генератора, которая дает совпадающие с экспериментом результаты и может быть использована для определения оптимального по максимальной мощности сопротивления потребителя и для вычисления параметров генератора при его проектировании.

Ключевые слова: коммутаторный взаимно индуктивно-конденсаторный импульсный генератор, нелинейные регулировочные характеристики, методика расчета, эксперимент.

It is shown that a commutator mutually inductive-capacitor pulse generator without a spark gap or other high-voltage switch reliably and with a long service life provides current pulses to a high-voltage consumer, which can be, for example, a magnetron in pulse-frequency mode of operation at a power of up to 1 kW or more. Experimentally, increasing nonlinear control characteristics for the voltage of a resistive consumer and falling linear external voltage characteristics for the voltage and current of this consumer are obtained with an increase in

the relative duration of the switched-on state of the switch (IGBT transistor) and with an increase in the current of the consumer. A method has been developed for calculating the adjustment and external characteristics of the generator, which gives results consistent with the experiment and can be used to determine the optimal maximum power resistance of the consumer and to calculate the parameters of the generator during its design.

Key words: commutator mutually inductive-capacitor pulse generator, nonlinear adjustment characteristics, calculation method, experiment.

Электротехника, 2025, №3, стр. 66-71

Исследование эксплуатационных свойств электроизоляционных лаковых защитных покрытий на основе эпоксидиановой смолы и аминотрисилоксанов различного строения

ЯКОВЛЕВА А.В., ЛУКИН А.В., ИВАНОВА К.Ю., КУЗЬМИН М.В., КОЛЯМШИН О.А.

Рассмотрены возможности улучшения эксплуатационных и диэлектрических свойств эпоксиаминных электроизоляционных лаковых покрытий для обмоток электродвигателей с определением оптимальных соотношений компонентов смеси. Установлено, что отверждение новыми аминосилосанамми улучшает диэлектрические и эксплуатационные характеристики лаковых составов. Экспериментально изучена возможность использования аминосилосанов в качестве отвердителей эпоксидиановых смол, рекомендованных для использования в качестве лакового покрытия для обмоток электродвигателей. Исследована адгезионная прочность и термическая стойкость разработанных эпоксиаминных лаковых покрытий. Использование аминосилосанов приводит к увеличению адгезионной прочности и термической стойкости лаковых составов.

Ключевые слова: обмотки электродвигателей, лаковые защитные покрытия, дифенилсиландиол, эпоксидиановые смолы, аминотрисилоксаны, физико-механические и электроизоляционные свойства, термомеханический анализ, дифференциально-термический анализ, динамический механический анализ.

The possibilities of improving the operational and dielectric properties of epoxyamine electrical insulating varnishes for electric motor windings with the determination of optimal ratios of the mixture components are considered. It has been established that curing with new aminosiloxanes improves the dielectric and operational characteristics of varnish formulations. The possibility of using aminosiloxanes as hardeners of epoxidian resins recommended for use as a varnish coating for electric motor windings has been experimentally studied. The adhesive strength and thermal resistance of the developed epoxyamine varnishes are investigated. The use of aminosiloxanes leads to an increase in the adhesive strength and thermal stability of varnish formulations.

Key words: electric motor windings, lacquer protective coatings, diphenyl silanediol, epoxidian resins, aminotrisiloxanes, physico-mechanical and electro-insulating properties, thermomechanical analysis, differential thermal analysis, dynamic mechanical analysis.

Электротехника, 2025, №3, стр. 72-79

Надежность и безопасность человеко-машинных систем в ответственных технологических процессах

БОЯРИНОВА Н.А., ПЕНЬКОВА Н.Г., ШУБИНСКИЙ И.Б., ИНЬКОВ Ю.М.

Применительно к железнодорожному транспорту показано, что создание рабочей среды машиниста, включающей вспомогательные действия и источники дополнительной информации о маршруте и действующих ограничениях, позволяет значительно увеличить вероятность безошибочной работы машиниста. На основе статистических данных показано, что наибольшее влияние на показатель безотказной работы оказывают приборы безопасности, дежурный по направлению, дежурный по станции и электронная карта. Важными также являются первоисточники данных, такие как машинист-инструктор, контроллер безопасности, дежурный по переезду и информация из баз данных о временных и постоянных ограничениях. Полученные показатели и методики анализа влияния различных факторов на вероятность безошибочной работы машиниста могут быть применены не только к железнодорожному транспорту, но и к другим технологическим и транспортным системам. Эти методы могут помочь в создании эффективных рабочих сред и систем поддержки для операторов в авиации, морском и автомобильном транспорте, а также в различных промышленных процессах, где точность и надежность работы человека

критически важны.

Ключевые слова: ответственные технологические процессы, надежность и безопасность человеко-машинных систем, железнодорожный транспорт, рабочая среда машиниста, показатели безотказной работы.

In relation to railway transport, it is shown that the creation of a working environment for the driver, including auxiliary actions and sources of additional information about the route and current restrictions, can significantly increase the probability of error-free operation of the driver. Based on statistical data, it is shown that the greatest impact on the uptime indicator is exerted by safety devices, the person on duty in the direction, the person on duty at the station and the electronic map. Primary data sources are also important, such as the train driver, the safety controller, the moving attendant, and information from databases on temporary and permanent restrictions. The obtained indicators and methods of analyzing the influence of various factors on the probability of error-free operation of the driver can be applied not only to railway transport, but also to other technological and transport systems. These methods can help create efficient work environments and support systems for operators in aviation, marine and road transport, as well as in various industrial processes where precision and reliability of human operation are critically important.

Key words: responsible technological processes, reliability and safety of human-machine systems, railway transport, driver's working environment, uptime indicators.

Электротехника, 2025, №3, стр. 80-87

Математическая модель для расчета среднесуточного солнечного излучения МИТРОФАНОВ С.В.

Рассмотрен ряд математических моделей для расчета среднесуточного солнечного излучения. Показано, что наименьшую погрешность расчета имеет метод рассеянного солнечного излучения. Предложенные методы расчета для подвижных и неподвижных фотоэлектрических панелей позволяют повысить точность прогнозирования выработки электроэнергии солнечными станциями. Погрешность рассмотренных математических моделей применительно к условиям г. Оренбурга оказалась приемлемой для

инженерных расчетов. По сравнению с существующими методиками прогнозирования, предложенный подход позволил повысить точность расчетов более чем на 30%, что дает более точные оценки срока окупаемости устанавливаемого оборудования.

Выбранные методики могут быть использованы при создании систем автоматизированного проектирования солнечных станций и для поверочных расчетов.

Ключевые слова: солнечные станции, выработка электроэнергии, фотоэлектрические панели, среднесуточное солнечное излучение, математические модели.

A number of mathematical models for calculating the average daily solar radiation are considered. It is shown that the method of scattered solar radiation has the lowest calculation error. The proposed calculation methods for mobile and fixed photovoltaic panels make it possible to increase the accuracy of forecasting electricity generation by solar power plants. The error of the considered mathematical models in relation to the conditions of Orenburg turned out to be acceptable for engineering calculations. Compared with existing forecasting methods, the proposed approach has improved the accuracy of calculations by more than 30%, which gives more accurate estimates of the payback period of the installed equipment. The selected methods can be used in the creation of computer-aided design systems for solar power plants and for verification calculations.

Key words: solar power plants, power generation, photovoltaic panels, average daily solar radiation, mathematical models.

Электротехника, 2025, №3, стр. 88-89

Авторы номера