

Содержание

Электротехника, 2025, №10, стр. 2-8

Вариативный прогноз технического состояния оборудования ветроэнергетической установки

КОЧЕГАНОВ Д.М., СЕРЕБРЯКОВ А.В., СТЕКЛОВ А.С.

Для минимизации риска ошибочных управленческих решений, обусловленных неверными прогнозами, рассмотрен комплексный подход, использующий несколько методов прогнозирования, каждый из которых базируется на уникальном математическом аппарате. Предложен способ прогнозирования количественной оценки технического состояния ветроэнергетической установки, основанный на совместном применении адаптивной нейро-нечеткой системы вывода ANFIS и сети с долгой кратковременной памятью LSTM для получения вариативного прогноза технического состояния оборудования ветроэнергетической установки. Сравнение данных при ошибочном прогнозе одной из систем позволяет повысить точность прогнозирования количественной оценки технического состояния.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, техническое состояние, прогнозирование, искусственная нейронная сеть.

To minimize the risk of erroneous management decisions caused by incorrect forecasts, an integrated approach using several forecasting methods, each of which is based on a unique mathematical apparatus, is considered. A method for predicting the quantitative assessment of the technical condition of a wind power plant is proposed, based on the combined use of the adaptive neuro-fuzzy inference system ANFIS and a network with long-term short-term memory LSTM to obtain a variable forecast of the technical condition of the equipment of a wind power plant. Comparing data with an erroneous forecast of one of the systems makes it possible to increase the accuracy of forecasting a quantitative assessment of the technical condition.

Key words: wind power plant, technical condition, forecasting, artificial neural network.

Электротехника, 2025, №10, стр. 9-14

Конвертер на базе двухканального безмостового выпрямителя

АЛЕШИН Д.А., ЧИВЕНКОВ А.И., ТРОФИМОВ И.М., ШАЛУХО А.В., МУРАШОВ А.Д.

Статья посвящена разработке и исследованию конвертера, предназначенного для использования в гибридных электроэнергетических комплексах, зарядных устройствах аккумуляторных батарей, лабораторных источниках питания. Схемотехническое решение, основанное на адаптации топологии двухканального безмостового выпрямителя для конвертера с двухполярным выходным напряжением и аналогичным набором компонентов, позволяет уменьшить номенклатуру компонентной базы и стоимость преобразователя. Разработана имитационная компьютерная модель конвертера, с помощью которой выполнена апробация алгоритмов управления и проведены исследования эффективности регулирования выходного напряжения. Результаты имитационного моделирования показали, что коэффициент нелинейности передаточной функции выходного напряжения и коэффициент пульсаций не превысили допустимых значений (1,5 и 1,25%). Испытания конвертера в составе опытного образца твердотельного трансформатора низкого напряжения подтвердили эффективность работы конвертера. Среднее значение напряжения соответствовало заданному уровню во всем диапазоне входных напряжений. Коэффициент пульсаций выходного напряжения не превышал 2%.

Ключевые слова: конвертер, двухканальный безмостовой выпрямитель, твердотельный трансформатор низкого напряжения, алгоритмы управления.

The article is devoted to the development and research of a converter designed for use in hybrid electric power complexes, battery chargers, and laboratory power sources. The circuit design solution, based on adapting the topology of a two-channel bridge-less rectifier for a converter with a bipolar output voltage and a similar set of components, reduces the range of components and the cost of the converter. A simulation computer model of the converter has been developed, with the help of which control algorithms have been tested and studies of the effectiveness of output voltage regulation have been conducted. The simulation results showed that the nonlinearity coefficient of the output voltage transfer function and the ripple coefficient did not exceed the permissible values (1,5 and 1,25%). Tests of the converter as part of a prototype of a low-voltage solid-state transformer confirmed the efficiency of the

converter. The average voltage value corresponded to the set level over the entire input voltage range. The ripple coefficient of the output voltage did not exceed 2%.

Key words: converter, two-channel bridge-less rectifier, low-voltage solid-state transformer, control algorithms.

Электротехника, 2025, №10, стр. 15-25

Применение технологий искусственных нейронных сетей в системах управления энергоустановок на основе водородных топливных элементов с открытым катодом

ЛИПУЖИН И.А., ШАЛУХО А.В., САННИКОВ А.Н.

В статье представлены результаты исследования возможности применения технологий искусственных нейронных сетей (ИНС) для прогнозирования характеристик энергоустановок с водородными топливными элементами (ТЭ) с открытым катодом при изменении параметров окружающей среды. Представлены результаты экспериментов в климатической камере по исследованию влияния температуры окружающей среды на ТЭ с полимерной протонообменной мембраной, которые использованы для разработки баз данных для обучения ИНС. Предложена архитектура рекуррентной ИНС для прогнозирования напряжения и расхода водорода ТЭ. Результаты обучения подтверждают возможность применения технологий ИНС при построении адаптивных систем управления энергоустановками на основе ТЭ.

Ключевые слова: энергоустановки на основе водородных топливных элементов, системы управления, искусственная нейронная сеть, прогнозирование характеристик, влияние температуры.

The article presents the results of a study on the possibility of using artificial neural network (ANN) technologies to predict the characteristics of open-cathode hydrogen fuel cell (HFC) power plants when environmental parameters change. The results of experiments in a climate chamber to study the effect of ambient temperature on thermal power plants with a polymer proton exchange membrane are presented, which were used to develop databases for the training of ANN. A recurrent ANN architecture is proposed for predicting the voltage and flow rate of HFC. The results of the training confirm the possibility of using ANN technologies in the construction of adaptive control systems for power plants based on HFC.

Key words: power plants based on hydrogen fuel cells, control systems, artificial neural network, prediction of characteristics, influence of temperature.

Электротехника, 2025, №10, стр. 26-37

Исследование режимов работы в замкнутой электрической сети 10 кВ с источником распределенной генерации и тиристорным регулятором напряжения

СОСНИНА Е.Н., КРАЛИН А.А., БЕДРЕТДИНОВ Р.Ш., КРЮКОВ Е.В., ГУСЕВ Д.А.

Рассмотрен подход к управлению потоками мощности в распределительной электрической сети (РЭС) среднего напряжения при питании потребителей электроэнергии от централизованной электрической сети (ЦЭС) и от источников распределенной генерации (РГ). Применение тиристорного регулятора напряжения (ТРН) в замкнутой сети среднего напряжения позволяет перераспределять мощность, потребляемую от ЦЭС и РГ. Управление потоком мощности через тиристорный регулятор осуществляется путем поперечного регулирования напряжения – изменением фазового сдвига между входным и выходным напряжениями устройства. Для оценки эффективности поперечного регулирования с помощью тиристорного регулятора предложена математическая модель замкнутой распределительной сети с источником РГ, нагрузкой и тиристорным регулятором. Расчет параметров сети выполнен методом узловых потенциалов. Исследованы основные режимы сети: при номинальной и максимальной нагрузке и при непостоянстве выработки электроэнергии устройствами распределенной генерации. Результаты исследований позволяют оценить влияние тиристорного регулятора на параметры режимов сети, изменение потоков мощности, потерь в сети, предусмотреть различные варианты потребления активной мощности из ЦЭС и РГ.

Ключевые слова: электрическая сеть 10 кВ, источник распределенной генерации, тиристорный регулятор напряжения, ветроэнергетическая установка, фазовый сдвиг напряжения, управление потоками мощности, математическая модель.

An approach to managing power flows in a medium-voltage distribution electric grid (RES) when powering electricity consumers from a centralized electric grid (CEG) and from distributed generation sources (RS) is considered. The use of a thyristor voltage regulator (TVR) in a closed medium-voltage network makes it possible to redistribute the power

consumed from the CEG and the RS. The power flow through the thyristor regulator is controlled by transverse voltage regulation – changing the phase shift between the input and output voltages of the device. To evaluate the effectiveness of transverse regulation using a thyristor regulator, a mathematical model of a closed distribution network with a power supply, load and a thyristor regulator is proposed. The calculation of network parameters is performed by the method of nodal potentials. The main modes of the network are investigated: at nominal and maximum load and with intermittent power generation by distributed generation devices. The research results make it possible to evaluate the effect of the thyristor regulator on the parameters of network modes, changes in power flows, losses in the network, and to provide various options for the consumption of active power from the CEG and the RS.

Key words: 10 kV electric grid, distributed generation source, thyristor voltage regulator, wind power plant, phase shift of voltage, control of power flows, mathematical model.

Электротехника, 2025, №10, стр. 38-44

Наблюдатель переменных состояния асинхронного двигателя на основе алгоритма Люенбергера с системой скользящего режима

ДАРЬЕНКОВ А.Б., ХРАМОВ А.Е., КУРКИН А.А.

Разработана методика синтеза наблюдателя состояния асинхронного двигателя на основе алгоритма Люенбергера, работающего в режиме скольжения. Синтезирован алгоритм определения частоты вращения, модуля потокосцепления и угла поворота ротора асинхронного двигателя, отличающийся тем, что процесс определения неизмеряемых координат двигателя характеризуется повышенной точностью рассчитанных переменных в статических и динамических режимах работы с сохранением устойчивости работы наблюдателя при изменении активных сопротивлений статора и ротора двигателя. Разработана математическая модель наблюдателя, выполнены имитационные исследования, которые показали работоспособность предлагаемого алгоритма определения неизмеряемых переменных асинхронного двигателя.

Ключевые слова: векторное управление, асинхронный двигатель, наблюдатель состояния двигателя, алгоритм Люенбергера, система скользящего режима.

A method for synthesizing an asynchronous motor state observer based on the Luenberger algorithm operating in the sliding mode has been developed. An algorithm for determining the rotational speed, flow coupling modulus, and rotation angle of an asynchronous motor rotor is synthesized, characterized in that the process of determining the immeasurable coordinates of the motor is characterized by increased accuracy of calculated variables in static and dynamic operating modes while maintaining the stability of the observer's operation when the active resistances of the stator and the rotor of the motor change. A mathematical model of the observer has been developed, simulation studies have been performed, which have shown the operability of the proposed algorithm for determining immeasurable variables of an asynchronous motor.

Key words: vector control, asynchronous motor, motor state observer, Luenberger algorithm, sliding mode system.

Электротехника, 2025, №10, стр. 45-51

Модульная система электропитания глубоководных беспилотных аппаратов на базе резонансных инверторов

СОКОЛОВ В.В., ВАНЯЕВ В.В., ДАРЬЕНКОВ А.Б., ХРАМОВ А.Е., ПЕТУХОВ Н.М., ЧУГРОВ А.А.

Предложен модульный вариант построения надводной и подводной частей системы электропитания глубоководных беспилотных аппаратов, построенной на базе транзисторных DC/DC преобразователей с последовательными полумостовыми резонансными инверторами. Выявлены особенности работы подводной части, содержащей ряд модулей, последовательно соединенных по входным цепям.

Предложен и обоснован вариант управления модулями подводной части, обеспечивающий устойчивую и надежную работу системы электропитания в широком диапазоне нагрузок. Приведены результаты имитационного моделирования процессов в подводной части системы питания в стационарных и переходных режимах.

Ключевые слова: глубоководные беспилотные аппараты, системы электропитания, резонансный инвертор, вольтамперная характеристика, сопротивление нагрузки, волновое сопротивление резонансного контура, система автоматического регулирования.

A modular design option for the surface and underwater parts of the power supply system for deep-sea unmanned vehicles based on transistor DC/DC converters with sequential half-bridge resonant inverters is proposed. The features of the underwater part, which contains a number of modules connected in series via input circuits, are revealed. A control option for the modules of the underwater part is proposed and justified, ensuring stable and reliable operation of the power supply system in a wide range of loads. The results of simulation modeling of processes in the underwater part of the power supply system in stationary and transient modes are presented.

Key words: deep-sea unmanned vehicles, power supply systems, resonant inverter, volt-ampere characteristic, load resistance, wave resistance of the resonant circuit, automatic control system.

Электротехника, 2025, №10, стр. 52-58

Исследование электродинамических процессов в системах электроснабжения с источником распределенной генерации инверторного включения

КРЮКОВ Е.В., ЛОСКУТОВ А.А., ПЕТУХОВ Я.И.

Рассмотрена имитационная модель виртуального синхронного генератора в составе систем электроснабжения с распределенной генерацией. Модель содержит блоки управления активной мощностью и частотой, реактивной мощностью и напряжением, а также блок виртуальной инерции. Для оценки эффективности работоспособности алгоритма виртуального синхронного генератора проведено его сравнение с обычным инвертором, который не способен демпфировать колебания частоты и напряжения, и синхронным генератором. Моделирование трех режимов работы (автономное питание, параллельная работа с централизованной электроэнергетической системой, сравнение с классическим синхронным генератором) показало, что виртуальный синхронный генератор снижает скорость изменения частоты и амплитуду колебаний, а также уменьшает длительность переходных процессов благодаря виртуальному демпферу.

Ключевые слова: распределенная генерация, виртуальный синхронный генератор, динамическая устойчивость, MATLAB Simulink.

A simulation model of a virtual synchronous generator as part of power supply systems with distributed generation is considered. The model contains control units for active power and

frequency, reactive power and voltage, as well as a virtual inertia unit. To evaluate the efficiency of the virtual synchronous generator algorithm, it was compared with a conventional inverter, which is unable to dampen frequency and voltage fluctuations, and a synchronous generator. Modeling of three modes of operation (autonomous power supply, parallel operation with a centralized electric power system, comparison with a classical synchronous generator) showed that a virtual synchronous generator reduces the rate of change in frequency and amplitude of oscillations, and also reduces the duration of transients due to a virtual damper.

Key words: distributed generation, virtual synchronous generator, dynamic stability, MATLAB Simulink.

Электротехника, 2025, №10, стр. 59-69

Метод выявления киберугроз на цифровых подстанциях

ЛОСКУТОВ А.А., КУЛИКОВ А.Л., ПЕЛЕВИН П.С., СИМАНОВ А.С.

Рассмотрен один из подходов по обнаружению киберугроз на цифровой подстанции посредством разработки и исследования базового алгоритма обеспечения информационной безопасности шины процесса с использованием фундаментальных законов электротехники (закона Кирхгофа, Ома, принципа суперпозиции, выявления небаланса токов) во взаимодействии с закономерностями и правилами функционирования вычислительных сетей цифровой подстанции, использующих семиуровневую модель ISO/OSI. Предложен способ выявления киберугрозы на цифровой подстанции, связанной с подменой измерений токов и напряжений (спуфинг-атаки), а также несанкционированного воздействия на цифровую шину подстанции или датчики измерений и устройства обработки токов и напряжений.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура, цифровые подстанции, киберугрозы, базовый алгоритм обеспечения информационной безопасности, спуфинг-атака.

One of the approaches to detecting cyber threats at a digital substation is considered by developing and researching a basic algorithm for ensuring information security of the process bus using the fundamental laws of electrical engineering (Kirchhoff's law, Ohm's law, the principle of superposition, and current imbalance detection) in interaction with the patterns

and rules of operation of digital substation computer networks using the ISO/OSI seven-level model. A method is proposed for detecting cyber threats at a digital substation related to the substitution of current and voltage measurements (spoofing attacks), as well as unauthorized interference with the substation's digital bus or measurement sensors and current and voltage processing devices.

Key words: critical information infrastructure, digital substations, cyber threats, basic information security algorithm, spoofing attack.

Электротехника, 2025, №10, стр. 70-76

О поглощении энергии колебаний проводов воздушных линий электропередачи магнитореологическим демпфером

ЕРМОЛАЕВ А.И., ПЛЕХОВ А.С., ТИШИН И.В.

Рассмотрены конструкция и принцип работы магнитореологического демпфера, приведены его статические и динамические уравнения, на основе которых разработана компьютерная модель его динамического поведения. Получены зависимости рассеиваемой демпфером энергии колебаний от частоты периодического возмущающего воздействия при различных коэффициентах демпфирования. Определен оптимальный коэффициент демпфирования пассивного демпфера, при котором достигается наилучшее виброгашение в частотном диапазоне от 0,1 до 100 Гц; установлено, что при управлении коэффициентом демпфирования количество поглощаемой демпфером энергии увеличивается на 20–25 % по сравнению с работой при постоянном оптимальном коэффициенте демпфирования.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, пляска проводов, эолова вибрация, поглощение энергии колебаний, магнитореологический демпфер, динамическая модель демпфера, коэффициент демпфирования.

The design and principle of operation of a magnetorheological damper are considered, its static and dynamic equations are given, on the basis of which a computer model of its dynamic behavior is developed. The dependences of the oscillation energy dissipated by the damper on the frequency of the periodic disturbing effect at different damping coefficients are obtained. The optimal damping coefficient of the passive damper has been determined, which achieves the best vibration damping in the frequency range from 0.1 to 100 Hz.; It has been

found that when the damping coefficient is controlled, the amount of energy absorbed by the damper increases by 20-25% compared to operation at a constant optimal damping coefficient.

Key words: overhead power transmission lines, wire dance, Aeolian vibration, absorption of oscillation energy, magnetorheological damper, dynamic damper model, damping coefficient.

Электротехника, 2025, №10, стр. 77-84

Характеристики электрической машины с магнитопроводом сложной формы из магнитомягкого композитного материала

КАЧАНОВ И.М., ИВАНОВ Н.С., ШИРОКОВА М.В., ЖУРАВЛЕВ С.В.

Рассмотрена возможность использования магнитомягких композитных материалов для магнитопровода трехмерной формы электрических машин. На примере электродвигателя с внешним ротором, возбуждением от постоянным магнитов и магнитопроводом из шихтованной электротехнической стали разработана конструкция с магнитопроводом трехмерной формы из материала Somaloy 700 HR 5P, которая обеспечивает аналогичную мощность. Оценены уровень насыщения магнитной цепи, потери в машине, а также массогабаритные параметры рассматриваемой конструкции.

Ключевые слова: синхронный электродвигатель, трехмерный магнитопровод, магнитомягкий композитный материал, насыщение магнитной цепи, потери, массогабаритные параметры.

The possibility of using magnetically soft composite materials for a magnetic circuit of three-dimensional shape of electric machines is considered. Using the example of an electric motor with an external rotor, excitation from permanent magnets and a magnetic core made of mixed electrical steel, a design with a three-dimensional magnetic core made of Somaloy 700 HR 5P material has been developed, which provides similar power. The saturation level of the magnetic circuit, losses in the machine, as well as the weight and size parameters of the considered design are estimated.

Key words: synchronous electric motor, three-dimensional magnetic circuit, magnetically soft composite material, saturation of the magnetic circuit, losses, weight and size parameters.

Электротехника, 2025, №10, стр. 85-92

Бесперебойный сетевой источник питания с мягким переключением силовых транзисторов

СЕРЕГИН Д.А., ПАНФИЛОВ Д.И., АСТАШЕВ М.Г., БАДАЛЯН А.В., РОЖКОВ А.Н., КУЗИН С.Ю.

Представлен источник бесперебойного питания для устройств автоматики и связи, содержащий все необходимые блоки для работы от промышленной сети, переключения на питание от аккумуляторной батареи, заряда батареи, мониторинга режимов работы и защит. В источнике реализовано мягкое переключение силовых транзисторов в широком диапазоне питающих напряжений и токов нагрузки. Представлены результаты схемотехнического моделирования в системе LtSpice и испытаний опытного образца, подтверждающие описанный подход к выбору параметров силовой схемы источника питания для получения требуемых характеристик.

Ключевые слова: источник бесперебойного питания, интеллектуальная система управления, мягкое переключение транзисторов, численное схемотехническое моделирование.

An uninterruptible power supply for automation and communication devices is presented, containing all the necessary units for operation from an industrial network, switching to battery power, battery charging, monitoring operating modes and protections. The source implements soft switching of power transistors in a wide range of supply voltages and load currents. The results of circuit modeling in the LTspice system and prototype tests are presented, confirming the described approach to selecting the parameters of the power supply circuit to obtain the required characteristics.

Key words: uninterruptible power supply, intelligent control system, soft switching of transistors, numerical circuit modeling.

Электротехника, 2025, №10, стр. 93-95

Авторы номера

Электротехника, 2025, №10, стр. 96-97

Юрий Моисеевич Иньков

(18.05.1937-14.09.2025)