

Основные направления развития судовой электротехники

ШЕЛУДЬКО В. Н., СЕНТЯБРЕВ Ю.В., ГРИГОРЬЕВ А.В.

Рассмотрены основные направления развития судовой электротехники и автоматизации, к которым относятся: совершенствование систем генерирования и распределения электроэнергии, совершенствование систем электродвижения и пропульсивных установок. Показана целесообразность применения вентильных генераторных агрегатов и перехода к распределению электроэнергии на постоянном токе. Активное развитие на морском транспорте получают статические источники электроэнергии нового поколения. Хорошие регулировочные характеристики, отсутствие ограничений по количеству реверсов и минимальной частоте вращения, высокий КПД при работе на долевых нагрузках, высокие перегрузочные способности по моменту на гребном винте значительно расширяют область применения современных систем электродвижения переменного тока. Стремление сочетать достоинства пропульсивных установок разных типов стимулировало создание комбинированных (гибридных) пропульсивных установок. Комбинированные установки имеют в своем составе традиционный тепловой главный двигатель и гребной электродвигатель. Главный тепловой или гребной электродвигатель для движения применяется в зависимости от режима эксплуатации и скорости хода судна. Сделан вывод, что основными задачами в развитии судовой электротехники являются: повышение энергоэффективности генерирования электроэнергии путем внедрения вентильных генераторных агрегатов; внедрение инновационных источников электроэнергии с высокими показателями экономичности и экологичности; применение гребных электродвигателей на постоянных магнитах и индукторного типа; применение комбинированных пропульсивных установок с обратимыми системами электродвижения.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, вентильный генератор, статический источник электроэнергии, система электродвижения, гребная электроустановка, комбинированная пропульсивная установка, искусственный интеллект.

The article discusses the main directions of the development of ship electrical engineering and automation, namely: improving the systems for generating and distributing electric power, improving the electric propulsion systems and propulsion plants, improving the automation systems. The expediency of using valve generator sets and the transition to the distribution of electricity on direct current is shown. New generation static power sources are actively developing and spreading both in industry and in sea transport. Good regulating characteristics, no limitation on the number of reverse and minimum rotational speed, high efficiency when

working at fractional loads, high overload torque on the propeller significantly expand the application area of modern electric propulsion systems. The desire to combine the advantages of different types of propulsion plants stimulated the creation of combined (hybrid) propulsion plants. Combined plants incorporate a traditional thermal main engine and an electric propulsion motor. The use of an engine or a motor depends on the mode of operation and the speed of the ship. It is concluded that the main tasks in the areas of development of marine electrical engineering are: improving the energy efficiency of the electric power generation process by introducing valve generating sets; introduction of innovative electric power sources with high rates of efficiency and environmental friendliness; the use of electric propulsion motors with permanent magnets and inductor type; the use of combined propulsion plants with reversible electric propulsion systems.

Key words: electric power system, valve generator, static electric power source, electric propulsion system, electric propulsion plant, combined propulsion plant.

Электротехника, 2021, №3, стр. 9-15

Опыт проектирования и испытания судовой электроэнергетической системы при модернизации дизель-электрического ледокола

ГРИГОРЬЕВ А.В., ВЕЙНМЕЙСТЕР А.В.

В статье рассмотрен опыт модернизации единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) с системой электродвижения (СЭД) дизель-электрического ледокола «Капитан Косолапов». Модернизация вызвана необходимостью замены оборудования ЕЭЭС с СЭД и продлением срока службы ледокола. Перед началом модернизации проведено техническое диагностирование основного электрооборудования ЕЭЭС с СЭД. При разработке технического проекта проведен сравнительный анализ схемо-технических решений, выполнены необходимые электротехнические расчеты. В процессе модернизации заменены главные дизель-генераторы, управляемые выпрямители якорной цепи, реверсивные управляемые выпрямители цепи возбуждения гребного электродвигателя. Разработана микропроцессорная система управления СЭД. Внедрена интегрированная система управления техническими средствами судна. Проведены швартовные, ходовые и ледовые испытания ледокола. При испытаниях ЕЭЭС проверялось качество электроэнергии в судовой сети, устойчивость автономной и параллельной работы дизель-генераторов, распределение активной и реактивной нагрузки. При испытаниях СЭД проведена оценка качества переходных процессов гребной электрической установки. Осциллографировались переходные процессы разгона,

торможения и реверса гребного электродвигателя. Успешно проведенная модернизация и испытания позволили продолжить эксплуатацию дизель-электрического ледокола «Капитан Косолапов».

Ключевые слова: дизель-электрический ледокол, электроэнергетическая система, система электродвижения, гребная электроустановка, главный дизель-генератор, полупроводниковый выпрямитель, полупроводниковый возбудитель, качество электроэнергии, переходный процесс, швартовные испытания, ходовые испытания, ледовые испытания.

The article considers the experience of modernization of the unified electric power system (UES) with the electric propulsion system (EPS) of the diesel-electric icebreaker «Captain Kosolapov». The modernization is caused by the need to replace the equipment of the UES with the EPS and extend the service life of the icebreaker. Before the start of the modernization, technical diagnostics of the main electrical equipment of the UES with EPS was carried out. During the development of the technical project, a comparative analysis of circuit and technical solutions was carried out, and the necessary electrical calculations were performed. In the process of modernization, the main diesel generators, controlled anchor chain rectifiers, and reversible controlled field circuit rectifiers of the propeller electric motor were replaced. A microprocessor-based control system for EPSW has been developed. An integrated control system for the ship's technical facilities has been implemented. Mooring, navigation and ice tests of the icebreaker were carried out. During the tests of the UES, the quality of electricity in the ship's network, the stability of autonomous and parallel operation of diesel generators, and the distribution of active and reactive loads were checked. During the SED tests, the quality of the transients of the rowing electrical installation was evaluated. The transient processes of acceleration, deceleration, and reverse of the propeller motor were oscillographed. The successful modernization and testing made it possible to continue the operation of the diesel-electric icebreaker «Kapitan Kosolapov».

Key words: diesel-electric icebreaker, electric power system, electric propulsion system, rowing electrical installation, main diesel generator, semiconductor rectifier, semiconductor exciter, power quality, transient process, mooring tests, sea trials, ice tests.

Электротехника, 2021, №3, стр. 16-20

Цифровой двойник установки индукционного нагрева углеродных волокон
ПЕРЕВАЛОВ Ю.Ю., ДЕМИДОВИЧ В.Б.

Рассмотрена разработка установки индукционного нагрева, которая позволяет выполнять последний этап термообработки графитовых волокон. На первом этапе разработки был создан цифровой двойник установки, который представляет собой сложную математическую модель, описывающую поведение разрабатываемой печи на всех этапах жизненного цикла. Рассмотрены особенности и сложности построения таких систем оптимального проектирования и управления комплексами электромагнитной обработки материалов в переменном поле.

Ключевые слова: углеродное волокно, термическая обработка, индуктивная передача энергии, индукционный нагрев, экранирование, цифровой двойник.

The article is devoted to a installation of induction heating, which makes it possible to carry out the last stage of heat treatment of graphite fiber. At the first stage of development, a digital twin of the installation was created, which is a complex mathematical model that describes the behavior of the developed furnace at all stages of the life cycle. The article discusses the features and difficulties of building such systems for optimal design and control of complexes for electromagnetic processing of materials in an alternating field.

Key words: carbon fiber, heat treatment, inductive power transmission, induction heating, shielding, digital twin.

Электротехника, 2021, №3, стр. 21-26

Спектральный анализ базовых алгоритмов широтно-импульсного управления без обратной связи для двухуровневых преобразователей частоты

ДОБРОСКОК Н.А., ЛАВРИНОВСКИЙ В.С.

Частотно-регулируемый электропривод, построенный по схеме «преобразователь частоты–электродвигатель переменного тока», широко распространен в современной технике и системах электродвижения различных транспортных средств. На данный момент разработано множество методов модуляции напряжения на выходе преобразователя частоты с целью приблизить его форму к синусоидальной с наименьшими потерями. Поскольку в зависимости от задачи приоритетными являются разные характеристики модуляции напряжения, то необходимо знать о преимуществах и недостатках основных алгоритмов формирования напряжения на выходе преобразователя частоты. Особенностью мощных систем электродвижения является невозможность

использования больших частот коммутации силовых ключей преобразователя частоты, что делает необходимым знание закономерностей формирования спектра напряжения при применении того или иного метода. В статье рассмотрены базовые алгоритмы формирования напряжения на выходе преобразователя частоты без обратной связи: скалярная и пространственно-векторная широтно-импульсная модуляция и расчетные алгоритмы формирования напряжения, а также проведен сравнительный анализ спектров и коэффициента несинусоидальности при соизмеримых частотах коммутации силовых ключей, выполненный как аналитически, что дает представление о принципах формирования спектра напряжения, так и посредством моделирования процессов в MATLAB Simulink.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция, избирательное исключение гармоник, вейвлет-модуляция, спектральный анализ, коэффициент несинусоидальности.

The frequency-controlled electric drive, built according to the scheme «frequency converter-AC electric motor», is widely used in modern technology and electric propulsion systems of various vehicles. At the moment, many methods of modulating the voltage at the output of the frequency converter have been developed in order to bring its shape closer to the sinusoidal one with the lowest losses. Since, depending on the task, different characteristics of voltage modulation are prioritized, it is necessary to know about the advantages and disadvantages of the main algorithms for generating voltage at the output of the frequency converter. A feature of high-power electric propulsion systems is the impossibility of using high switching frequencies of the power switches of the frequency converter, which makes it necessary to know the laws of the formation of the voltage spectrum when using a particular method. The article considers the basic algorithms for generating voltage at the output of a frequency converter without feedback: scalar and spatial-vector pulse-width modulation and computational algorithms for voltage formation, as well as a comparative analysis of the spectra and the non-sinusoidality coefficient at comparable switching frequencies of power switches, performed both analytically, which gives an idea of the principles of forming the voltage spectrum, and by modeling processes in MATLAB Simulink.

Key words: voltage source inverter, pulse-width modulation, selective harmonic elimination, wavelet modulation, spectral analysis, total harmonic distortion.

Мониторинг потребления электроэнергии по измерениям в выбранных узлах сети

КОРОВКИН Н.В., МИНЕВИЧ Т.Г., СОЛОВЬЕВА Е.Б.

Задачи определения мест несанкционированного отбора мощности в распределительной сети по измерениям в некоторых выбранных узлах имеют многочисленные приложения. Практический интерес к их решению возрастает с уменьшением числа узлов сети, необходимых для наблюдения. При относительном постоянстве напряжения узлов распределительной сети задача определения мощностей потребителей сводится к определению параметров схем замещения последних. Определение параметров, выполняемое по результатам измерений, представляет собой классическую обратную задачу теории цепей. В статье предложено решение этой задачи для трехфазной распределительной сети 0,4 кВ, имеющей 9–12 нагрузок, подлежащих контролю при измерениях только в двух узлах сети. Для решения задачи предложено в одном из узлов, где выполняются измерения, устанавливать изменяемую проводимость. Приведен общий подход к решению задач рассматриваемого типа. Полученные решения могут быть использованы для контроля состояния изоляторов высоковольтных линий, контроля температуры или влажности в зонах затрудненного доступа. Для сети с 9–12 нагрузками получены относительно простые аналитические соотношения, позволяющие оперативно получать информацию о нагрузках сети по данным измерений. Также приведено решение задачи определения ЭДС нескольких параллельно включенных термопар, используемых как датчики температуры.

Ключевые слова: мониторинг потребления электроэнергии, обратная задача, измерение напряжений, определение ЭДС термопар, теория электрических цепей, идентификация, билинейная теорема.

The tasks of determining the places of unauthorized power take-off in the distribution network based on measurements in some selected nodes have numerous applications. The practical interest in their solution increases, with a decrease in the number of network nodes required for observation. With a relatively constant voltage of the nodes of the distribution network, the task of determining the capacities of consumers is reduced to determining the parameters of the equivalent circuits of the latter. Parameter determination based on measurement results is a classic inverse problem of circuit theory. The article proposes a solution to this problem for a three-phase distribution network of 0,4 kV, having 9–12 loads, which are subject to control when

measured only in two network nodes. To solve the problem, it was proposed to set variable conductivity in one of the nodes where measurements are performed. A general approach to solving problems of this type is presented. The solutions obtained can be used to monitor the state of insulators of high-voltage lines, to monitor temperature or humidity in areas of difficult access. For a network with 9–12 loads, relatively simple analytical relationships have been obtained, which make it possible to quickly obtain information about the network loads based on measurement data. The solution to the problem of determining the EMF of several parallel-connected thermocouples used as temperature sensors is also given.

Key words: monitoring of electricity consumption, inverse problem, voltage measurement, determination of EMF of thermocouples, theory of electrical circuits, identification, bilinear theorem.

Электротехника, 2021, №3, стр. 32-36

Трёхмерная динамическая модель стартового нагрева при индукционной плавке в холодном тигле

СКРИГАН И.Н., ЛОПУХ Д.Б., ВАВИЛОВ А.В., МАРТЫНОВ А.П.

В статье представлены результаты по созданию и апробации численной динамической модели стартового нагрева при индукционной плавке в холодном тигле. Разработанная модель позволяет определять электрические и тепловые характеристики индукционной печи в холодном тигле в динамическом режиме – распределение источников тепла в элементах печи, распределение температуры в расплаве и стартовом материале, распределение и направление скорости в расплаве, электрические параметры индуктора, время стартового нагрева и выхода на установившийся режим плавки и т.д. В перспективе модель позволяет оценивать тепловую устойчивость плавки без проведения экспериментов, что особенно актуально при разработке устройств остекловывания высокоактивных отходов. Рассмотрены результаты моделирования стартового нагрева стекла в холодном тигле с внутренним диаметром 200 мм при частоте тока 1,76 МГц.

Ключевые слова: индукционная плавка, холодный тигель, электрические и тепловые характеристики печи, численное моделирование, стартовый нагрев.

This paper the results of creating and testing a numerical dynamic model of start-up heating during induction melting in a cold crucible is presented. The developed model allows to

determine the electric and thermal characteristics of induction furnace in a cold crucible in dynamic mode, which include: distribution of heat sources in the furnace elements; temperature distribution in the melt and the start-up material; the distribution and direction of the velocity in the melt; the electrical parameters of the inductor, the start-up heating time and output time to steady state melting, etc. Created model allows to evaluate the thermal stability of melting without conducting experiments, which is especially important, for instance, in the development of high-level waste vitrification installations. The results of simulation the star-up heating of glass in a cold crucible with an internal diameter of 200 mm at a current frequency of 1,76 MHz are considered.

Key words: induction melting, cold crucible, electric and thermal characteristics of the furnace, numerical simulation, start-up heating.

Электротехника, 2021, №3, стр. 36-41

Система управления электроприводами движения нижних конечностей экзоскелета на основе ПД-регулятора с нейронной сетью

БЕЛОВ М.П., КОЗЛОВА Л.П., ЧЬОНГ Д.Д.

В системе управления электроприводами движения нижних конечностей экзоскелета для компенсации неопределенных изменений гравитации, трения в сочленениях механических ног экзоскелета предлагается использовать ПД-регулятор с компенсатором на основе нейронной сети. Математическая модель нижних конечностей экзоскелета (НКЭ) (две ноги с пятью звеньями) построена на сагиттальной плоскости, с учетом нелинейных элементов и действия внешних возмущений. Приведены результаты моделирования управляемого движения экзоскелета в сагиттальной плоскости. Результаты моделирования показывают, что люди с помощью такого экзоскелета будут обладать способностью ритмичного движения тазобедренного и коленного суставов.

Ключевые слова: экзоскелет, следящее управление, движение звеньев экзоскелета, ПД-регулятор, компенсатор, нейронная сеть.

In the control system of electric drives for the movement of the lower limbs of the exoskeleton, it is proposed to use a PD controller with a compensator based on a neural network to compensate for uncertain changes in gravity and friction in the joints of the mechanical legs of the exoskeleton. The mathematical model of the lower limbs of the exoskeleton (LLE) (two legs with 5 links) is built on the sagittal plane, taking into account nonlinear elements and the action

of external disturbances. The results of modeling the controlled movement of the exoskeleton in the sagittal plane are presented. Simulation results show that people using this exoskeleton will have the ability to rhythmically move the hip and knee joints.

Key words: exoskeleton, variable command control, movement of exoskeleton links, PD regulator, compensator, neural network.

Электротехника, 2021, №3, стр. 42-46

Методика расчёта баланса энергии, выделяемой в элементах мощных импульсных установок

ГОНЧАРОВ В.Д., ЯШКАРДИН Р.В.

Предложена методика определения энергии, выделяющейся в элементах импульсных систем с мощными емкостными накопителями энергии. Методика основана на экспериментальном исследовании типичной формы импульса тока в установке и определении частотного диапазона, в котором надо проводить исследования; определении частотных характеристик отдельных элементов системы питания установки и составлении их схем замещения, характерных для выбранного частотного диапазона; разработке и исследовании общей схемы замещения импульсной установки. Приведены результаты расчётов, распределения энергетических потерь высоковольтной электрофизической установки, используемой для получения ультрадисперсных частиц. Показано, что при определении схемы замещения мощного ёмкостного накопителя необходимо учитывать способы соединения его отдельных элементов. Сравнение результатов численного моделирования распределения токов и напряжений на отдельных элементах установки с экспериментом показали достаточную точность результатов, полученных с помощью предложенной методики.

Ключевые слова: мощные импульсные установки, емкостные накопители, баланс мощности.

A method for determining the energy released in the elements of pulsed systems with powerful capacitive energy storage devices is proposed. The method is based on an experimental study of the typical shape of the current pulse in the device and determination of the frequency range in which the research should be carried out; on determining the frequency characteristics of individual elements of the power supply system of the device and creating their equivalent circuit specific to the selected frequency range; on the development and research of a general equivalent circuit for a pulse device. The results of calculations of the distribution of energy

losses of a high-voltage electrophysical device used to produce ultradisperse particles are presented. It is shown that it is necessary to take into account the ways of connecting its individual elements when determining the equivalent circuit of a powerful capacitive storage device. The comparison of the results of numerical simulation of the distribution of currents and voltages on individual elements of the device with the experiment showed sufficient accuracy of the results obtained using the proposed method.

Key words: high-power pulse installations, capacitive storage devices, power balance.

Электротехника, 2021, №3, стр. 47-53

Режим поддержания максимума мощности ветроустановки при векторном управлении синхронным генератором

САМОХВАЛОВ Д.В., ДЖАБЕР Д.И., АЛЬ-МАХТУРИ Ф.Ш.

Энергетическая эффективность систем преобразования энергии ветра в электрическую в значительной степени зависит от отношения скорости вращения вала ветротурбины к скорости ветра, приводящего ветрогенератор в движение. Обеспечение оптимальной скорости вращения турбины, при которой извлекается максимальная электрическая мощность из энергии ветра, производится с помощью режима максимума мощности и векторного управления синхронным генератором. Определены механические потери в редукторе и синхронной машине, учтены магнитные потери в стали синхронной машины и коммутационные потери в автономном инверторе напряжения. Получены зависимости КПД редуктора, синхронной машины, автономного инвертора напряжения и общего КПД ветроустановки от скорости вращения ротора ветротурбины. Найдены точки максимального КПД ветроустановки для различных значений скорости ветра.

Ключевые слова: ветроустановка, синхронный генератор с постоянными магнитами, режим поддержания максимума мощности, поле-ориентированное векторное управление, потери мощности, КПД.

The efficiency of systems for converting wind energy into electricity, to a large extent, depends on the ratio of the speed of rotation of the shaft of the wind turbine to the speed of the wind driving the wind turbine. In this paper, the dependence of the efficiency of a wind energy conversion system on wind speed is determined when using the mode of maintaining the maximum power point tracking, which allows you to extract maximum power from wind

energy. The provision of the optimal turbine rotation speed, calculated using the maximum power mode, is carried out using the vector control system of the permanent magnet synchronous generator. The mechanical losses in the gearbox and in the synchronous machine are determined, the losses in the steel of the synchronous machine and the switching losses in the autonomous voltage inverter are taken into account.

Key words: wind energy conversion system, permanent magnet synchronous generator, maximum power point tracking, field-oriented control, power losses; efficiency.

Электротехника, 2021, №3, стр. 53-59

Алгоритмы адаптивного управления для сервопривода с линейным электродвигателем

КУЗНЕЦОВ В.Е., СКАКУН А.Д, ФАН ТХАНЬ ЧУНГ, НГУЕН ДИНЬ ХАНЬ

Рассмотрена математическая модель сервосистемы, состоящей из линейного электродвигателя, приводящего в движение клапаны гидравлического привода.

Предложено аналитическое описание нелинейной тяговой характеристики двигателя, а также результирующей реакции от действия электромагнитной силы и силы упругости центрирующей пружины. Приведены адаптивные законы управления сервосистемой, выполнен сравнительный анализ эффективности адаптивных алгоритмов с эталонной моделью и по методу разделения движений. Исследования проведены на модели сервопривода в пакете программы MATLAB Simulink.

Ключевые слова: линейный электродвигатель силы, математическая модель, следящий привод, адаптивное управление, электрогидропривод.

This paper presents a mathematical model of a servo system consisting of a linear electric motor pulling a hydraulic drive valve. An analytical description of its nonlinear traction characteristic, as well as the resulting reaction from the action of the electromagnetic force and the elastic force of the centering spring, is presented. The adaptive laws of control of a servo system and a comparative analysis of the effectiveness of adaptive algorithms with a reference model and the method separated adaptive control are given. Simulation results on the model of the servo system with the controllers in the MATLAB Simulink software package are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed approaches in this paper.

Key words: linear electric motor, mathematical model, servo system, adaptive control, electrohydraulic drive.

Электротехника, 2021, №3, стр. 60-65

Моделирование внутригруппового движения синхронных генераторов

БУРМИСТРОВ А.А., ХЛЯМКОВ В.А., СОКОЛОВ П.В.

Рассмотрено внутригрупповое движение синхронных генераторов, работающих на шину бесконечной мощности. Анализируются перетоки электромагнитной энергии между генераторами, подключенными к общей шине. Для этого предлагается модель в MATLAB Simulink, включающая систему генераторов, линию и шину бесконечной мощности. Предложенная модель позволяет изучить вопросы устойчивости многоагрегатной энергосистемы в различных режимах функционирования. Также рассмотрены вопросы реализации автоматического регулятора возбуждения. Дан пример двухагрегатной системы, для которой получены рабочие характеристики.

Ключевые слова: энергосистема, синхронные генераторы, внутригрупповое движение, автоматическое регулирование возбуждения.

The intra-group motion of synchronous generators operating on an infinite power bus is considered. Electromagnetic energy flows between generators connected to a common bus are analyzed. For this purpose, a model is proposed in MATLAB Simulink, which includes a system of generators, a line and a bus of infinite power. The proposed model allows us to study the issues of stability of a multi-unit power system in various modes of operation. The implementation of the automatic excitation regulator is also considered. An example of a two-unit system for which the operating characteristics are obtained is given.

Key words: power system, synchronous generators, intra-group movement, automatic regulation of excitation.

Электротехника, 2021, №3, стр. 66-67

Авторы номера