

## **Выбор компенсирующих устройств распределительных сетях электроэнергетических систем**

ГЕРАСИМЕНКО А.А., НЕШАТАЕВ В.Б.

Рассмотрен практический вариант решения задачи оптимального выбора компенсирующих устройств, заключающийся в определении мест размещения, устанавливаемых мощностей и оптимальной загрузки источников реактивной мощности как в проектируемых, так и эксплуатируемых распределительных сетях и системах с учётом всей совокупности электрических режимов. Приведены основные теоретические положения статистического моделирования электрических нагрузок, расчёта потерь электроэнергии и других интегральных характеристик режимов на его основе. Показано формирование выражения целевой функции расчётных затрат и её составляющих, позволяющего вести оптимизационный поиск в пространстве параметров множества режимов с помощью разработанной на основе обобщённого метода приведенного градиента математической модели стохастической оптимизации.

**Ключевые слова:** распределительная электрическая сеть, реактивная мощность, компенсирующие устройства, потери электроэнергии, оптимизация, градиент, моделирование нагрузок

A practical version of solving the problem of determining the optimal choice of compensating devices is considered, which consists in determining the placement locations, installed capacities, and optimal loading of reactive power sources both in designed and operating distribution networks and systems taking into account the totality of electric operating conditions. The main theoretical principles of statistical modeling of electric load, calculation of electric energy losses, and other integral characteristics of operating modes determined on its basis are presented. An approach to construction of the expression for the objective function of calculated costs and its components is shown, using which it is possible to carry out an optimization search in the space of parameters characterizing a set of operating conditions using the mathematical model of stochastic optimization developed on the basis of mathematical model of stochastic optimization developed on the basis of the generalized reduced gradient method.

**Key words:** distribution electric network, reactive power, compensating devices, electric energy losses, optimization, gradient, load modeling

## **Целесообразность сооружения глубоких вводов для электроснабжения новых районов городов**

АКЧУРИНА С.А., ШВЕДОВ Г.В.

Приведен анализ параметров системы электроснабжения периферийных районов крупных городов с применением глубоких вводов высокого напряжения с учетом современных тенденций развития крупных городов. Сформирована топологическая и

технико-экономическая модель системы электроснабжения периферийных районов городов с применением глубоких вводов высокого напряжения. На основе сформированной технико-экономической модели определены условия экономической целесообразности сооружения глубоких вводов на территории периферийных районов, а также их оптимальные параметры. Полученные результаты позволяют принимать решения о сооружении глубокого ввода на территории периферийного района города, а также определить рациональное местоположение подстанции глубокого ввода относительно внешнего источника питания.

**Ключевые слова:** электроснабжение городов, подстанция, глубокий ввод, топологическая модель

The parameters of a system for supplying power to peripheral districts of large cities with the use of deep-input high-voltage load-center supply system are analyzed. The topological and technical-economic model of a system for supplying power to peripheral districts of cities with the use of such substations is constructed with due regard of modern trends in the development of cities. The conditions for economic advisability of constructing load-center supply system on the territory of peripheral districts and their optimal parameters are determined on the basis of the constructed technical-economic model. By using the obtained results it is possible to make decisions on constructing a deep-input load-center substation on the territory of a peripheral city district and to determine the appropriate location of a deep-input load-center substation with respect to an external power source.

**Key words:** power supply of cities, substation, deep input, topological model

### **Анализ гистерезисных потерь в силовых кабелях на основе высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения**

ЗУБКО В.В., ВЫСОЦКИЙ В.С., ФЕТИСОВ С.С., НОСОВ А.А., ЗАНЕГИН С.Ю.

Представлена численная модель для расчета гистерезисных потерь в сверхпроводящем слое и магнитной подложке высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) ленты второго поколения, а также в силовых кабелях на основе данных лент. При расчете гистерезисных потерь в сверхпроводящем слое в модели учтена нелинейность его сопротивления и неоднородность критической плотности тока по ширине сверхпроводящего слоя ленты. В модели при расчете гистерезисных потерь в ВТСП-лентах силового кабеля учтена геликоидальная структура ВТСП-лент в кабеле, что позволило значительно сократить время расчета. Исследованы гистерезисные потери отдельно в ВТСП-лентах второго поколения различных производителей и в силовых кабелях на их основе. Проведен сравнительный анализ измеренных гистерезисных потерь с численными расчетами. Показано влияние на гистерезисные потери в силовом кабеле магнитных свойств подложек и геометрических размеров ВТСП-лент второго поколения.

**Ключевые слова:** силовые кабели, высокотемпературные ленты второго поколения, гистерезисные потери

The paper presents a numerical model for calculating hysteresis losses in the superconducting layer and magnetic substrate of a second-generation high-temperature superconducting (HTS) tape and in power cables made on the basis of these tapes. The algorithm for calculating hysteresis losses in a superconducting layer laid down in the model takes into account the nonlinear characteristic of its resistance and nonuniformity of the critical current density over the width of tape superconducting layer. The algorithm for calculating hysteresis losses in the HTS tapes of a power cable implemented in the model takes into account the helicoidal structure of HTS taped in the cable, due to which a significantly shorter time of calculation was achieved. Hysteresis losses were calculated separately in second-generation HTS tapes produced by different manufacturers and in power cables made on their basis. A comparative analysis of measured hysteresis losses and numerical calculations is carried out. It is shown that the magnetic properties of substrates and geometrical sizes of second-generation HTS tapes have an effect on the hysteresis losses in a power cable.

**Key words:** power cables, second-generation high-temperature superconducting tapes, hysteresis losses

### **Особенности нагрева тонкого биметаллического проводника большим импульсным током**

БАРАНОВ М.И.

Приведены результаты исследования интенсивного нагрева тонкого круглого сплошного стального провода диаметром 1,6 мм и длиной 320 мм с цинковым покрытием толщиной 5 мкм под действием аperiodического импульса аксиального тока временной формы 9 мс/576 мс с амплитудой его плотности до 0,4 кА/мм<sup>2</sup>. Показано, что такой нагрев биметаллического провода сопровождается проявлением в нем нового теплофизического эффекта, характеризующегося неоднородным периодическим продольным температурным полем и наличием в проводе чередующихся «горячих» и «холодных» макроскопических продольных участков. Эксперименты и расчетные оценки теплового состояния исследуемого биметаллического провода указывают на то, что обнаруженное продольное расслоение провода на «горячие» и «холодные» участки связано с особенностями продольного распределения в нем дрейфующих свободных электронов и образованием ими вдоль провода волновых электронных пакетов.

**Ключевые слова:** биметаллический проводник, импульсный ток, свободные электроны, волновой электронный пакет, неоднородное периодическое продольное температурное поле

The article presents the results obtained from studying intense heating of a thin round solid steel wire 1.6-mm in diameter and 320-mm long with 5-mm-thick zinc coating under the effect

of an aperiodic impulse of axial current with a 9 ms/576 ms time shape and with its density amplitude of up to 0.4 kA/mm<sup>2</sup>. It is shown that with such heating of a bimetallic wire, a new thermal-physics effect appears in it, which is characterized by a nonuniform periodic longitudinal temperature field and by occurrence of alternating «hot» and «cold» macroscopic longitudinal zones in the wire. The results from experiments and numerical assessments of the thermal state of the bimetallic wire under study indicate that the revealed longitudinal stratification of the wire into «hot» and «cold» zones is connected with the specific features pertinent to longitudinal distribution in it of free drifting electrons, which form electronic wave packets along the wire.

**Key words:** bimetallic conductor, impulse current, free electrons, electronic wave packet, nonuniform periodic longitudinal temperature field

### **Математическая модель неявнополюсной электрической машины в матричной форме**

КУРИЛИН С.П., ДЕНИСОВ В.Н.

Представлена матричная модель неявнополюсной электрической машины, в которую включены ее симметричные и несимметричные исполнения. При этом состав составляющих главного магнитного поля и полей рассеяния машины может быть различным. Модели соответствует широкая область теоретического и практического приложения, включающая задачи диагностики электрических машин, разработки линейных машин и др. Описываются особенности параметрических матриц неявнополюсных электрических машин. Анализируются матрицы машин с фазным ротором, с короткозамкнутым ротором и линейной индукционной машины. Трехфазная электрическая машина представляется совокупностью двух взаимно перемещающихся трехфазных обмоток статора и ротора. В случае линейной индукционной машины сплошной вторичный элемент заменяется эквивалентной трехфазной обмоткой. Исследуются канонические базисы симметричной и несимметричной машин. Обсуждаются возможности замены векторно-матричной модели набором независимых скалярных уравнений через преобразование координат к каноническому базису.

**Ключевые слова:** неявнополюсная электрическая машина, математическая модель, параметрическая матрица, фазный ротор, короткозамкнутый ротор, линейная индукционная машина, преобразование координат, канонический базис

The matrix model of a nonsalient pole electrical machine is presented that comprises its symmetrical and asymmetrical versions. It should be noted that the composition of the components of the machine's main magnetic field and leakage fields may differ from one design to another. The model can be used in a wide range of theoretical and practical applications, including matters concerned with diagnostics of electrical machines, development of linear machines, etc. The specific features of the parametric matrices of nonsalient pole electrical machines are described. The matrices of machines with a phase-winding rotor and of a linear induction machine are analyzed. A three-phase electrical machine is represented by a system of

two mutually moving three-phase windings of stator and rotor. In the case of a linear induction machine, the solid secondary element is replaced by an equivalent three-phase winding. The canonic bases of symmetrical and asymmetrical machines are investigated. The possibilities of replacing the vector-matrix model by a set of scalar equations through transformation of coordinates to the canonic basis are discussed.

**Key words:** nonsalient pole electrical machine, mathematical model, parametric matrix, phase-winding rotor, short-circuited rotor, linear induction machine, transformation of coordinates, canonic basis

### **Способ и устройство синхронизации с сетью возбужденного синхронного генератора**

КОТЕЛЕНЕЦ Н.Ф., БОГАЧЕВ А.В., ЕЖОВ Е.В.

Рассмотрен способ синхронизации возбужденного синхронного генератора с сетью. В данном способе синхронизации момент включения генератора в сеть определяется в процессе его разгона под действием приводного двигателя. Возбуждение генератора должно быть таким, чтобы при синхронной частоте вращения его напряжение равнялось напряжению сети. По мере разгона генератора напряжение на его якорной обмотке увеличивается пропорционально частоте вращения и непрерывно сравнивается с напряжением сети. Генератор включается в сеть при приближении его частоты вращения к номинальному значению в момент, когда напряжение биения становится меньше заданной уставки. Исследования проведены на математической модели, предложена схема устройства, синхронизации.

**Ключевые слова:** энергосистема, параллельная работа генераторов, синхронизация возбужденного синхронного генератора с сетью, способ и устройство синхронизации

In modern power systems, a large number of synchronous generators installed at different power stations operate on the common grid. As a result, more reliable supply of power for consumers is achieved, smaller standby capacity has to be kept for emergency and repair contingencies, the possibility of seasonal maneuvering by energy resources becomes available, etc. [1, 2]. In order to keep the operation of electric network or grid undisturbed, prior to switch a generator for parallel operation with the other generators, its rotation frequency and voltage must be adjusted for setting up a proper moment of time for connecting the machine to the network. The totality of these operations is called synchronization. The considered method of synchronizing the excited synchronous generator with the grid consists in that the moment at which the generator is connected to the grid is determined in the course of speeding up the generator by its prime mover. The excitation of the generator must be such that its voltage was equal to the grid voltage at the synchronous rotation speed. As the generator is speeded up, the voltage at its armature winding increases in proportion to the rotation frequency and is continuously compared with the grid voltage. The generator is connected to the grid as its rotation frequency beat voltage becomes smaller than the specified

setpoint. The investigations were carried out on a mathematical model, and a schematic solution for the synchronization device is proposed.

**Key words:** power system, parallel operation of generators, synchronization of excited synchronous generator with the network, synchronization methods and devices

### **Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями в асинхронных электроприводах**

ВАСИЛЬЕВ Б.Ю., ДОБУШ В.С.

Рассмотрен электропривод на основе асинхронного двигателя, электроснабжение и управление которым осуществляется с помощью автономного инвертора. Рассмотрены алгоритмы управления режимами электродвигателя и автономным инвертором. Проведен анализ способов формирования выходного напряжения автономного инвертора. Проанализирован уровень электромагнитной совместимости автономного инвертора при различных алгоритмах управления.

**Ключевые слова:** электропривод, асинхронный двигатель, полупроводниковый преобразователь, широтно-импульсная модуляция, предмодуляция, электромагнитная совместимость

The problem of obtaining high dynamic characteristics of the electric drives of modern machines and mechanisms operating under harsh conditions is solved through the use of algorithms for vector and direct control of the driving electric motor operating modes. As a rule, such electrical engineering systems are constructed on the basis of an asynchronous (induction) electric motor and a two-link semiconductor frequency converter comprising a rectifier and a self-excited inverter [1–5]. It should be noted that efficient operation of such asynchronous electric drive (the level of electromagnetic compatibility and power performance characteristics) depend to a significant extent on the method used voltage produced by the self-excited inverter. An inductor motor-based electric drive powered and controlled by a self-excited inverter is considered. Algorithms for control of electric motor operating modes and of self-excited inverter are presented. Methods for shaping the output voltage produced by the self-excited inverter are analyzed. The level of self-excited inverter electromagnetic compatibility is analyzed for different control algorithms, in particular, in terms of such indicators as the current and voltage sine-wave form distortion factor, power factor, power source utilization factor, and others [8–9].

**Key words:** electric drive, asynchronous (induction) motor, semiconductor converter, pulse-width modulation, pre-modulation, electromagnetic compatibility

### **Численное математическое моделирование одноступенчатого магнитного редуктора1**

АФАНАСЬЕВ А.А., ЕФИМОВ В.В., НИКИТИН В.М.

Представлены результаты численного моделирования одноступенчатого магнитного редуктора с коэффициентом редукции 30 и максимальным предельным моментом 6 кНм. Рассматриваются меры по устранению осцилляций моментов на валах от высших гармоник магнитной индукции.

**Ключевые слова:** магнитный редуктор, математическая модель, пульсации моментов, высшие гармоники, магнитная индукция

Magnetic reducing gear is a comparatively intricate electromechanical device, the functional properties of which can be reliably estimated as a result of numerical mathematical modeling. The article presents the numerical mathematical model of a single-stage magnetic reducing gear with the maximal torque on the low-speed shaft equal to 6000 N m and reducing ratio equal to 30. The device comprises two coaxially arranged magnetolectric inductors in the form of a multipole stator with the pole number  $2p = 116$  and a four-pole (high-speed) inner rotor ( $2p_1 = 4$ ). Another (low-speed) rotor is coaxially placed between them, which is made on the form of a ferromagnetic squirrel cage with the number of laminated rectangular cross-section bars  $z = 60$ . This rotor serves as a link between the magnetic fields in the air gaps outside and inside of it with the numbers of pole pairs equal to  $p = 58$  and  $p_1 = 2$ , respectively. The low-speed rotor is sometimes called a magnetic field modulator. It was found from investigations that the  $2p$ -pole magnetic induction curve in the stator air gap has  $2p_1$  intervals, in which the mean values of induction correspond to the pole number of the inner rotor. The  $2p_1$ -pole magnetic induction curve in the inner rotor's air gap contains  $z$  dips caused by slits between the modulator's ferromagnetic bars. Two kinds of pulsations – high- and low-frequency – are superposed on the electromagnetic torques of the shafts. High-pressure pulsations are removed by organizing continuous skew of magnets in the inner rotor by the tooth pitch of modulator bars, and low-frequency pulsations are removed by placing stator magnets in two rows with shifting the rows by half the magnet width.

**Key words:** magnetic reducing gear, mathematical modeling, torque pulsations, higher harmonic components, magnetic induction