

**Моделирование сети электроснабжения промышленного предприятия с использованием постоянного тока**

ЗМИЕВА К.А.

Современное технологическое оборудование, приводимое в движение асинхронными трёхфазными электродвигателями, с целью упрощения кинематической схемы, улучшения эксплуатационных характеристик и расширения возможностей, как правило, снабжается блоком частотно-регулируемого привода, который позволяет плавно и в широком диапазоне изменять частоту вращения вала двигателя и момент на валу. Широкое распространение частотного управления приводит к заметному изменению структурного состава потребителей электроэнергии и ставит перед производителями, поставщиками и потребителями электроэнергии новые проблемы. Частотный преобразователь, как правило, строится по двухступенчатой схеме. Первая ступень представляет собой преобразователь переменного напряжения в постоянное. Затем постоянное напряжение преобразуется в переменное (обычно трёхфазное) требуемой частоты и амплитуды. Преобразователь промышленного трёхфазного напряжения в постоянное представляет собой нагрузку принципиально иного, нелинейного характера, причём параметры этих нелинейностей изменяются во времени. При широком применении частотных преобразователей для питания электродвигателей различного оборудования возникают проблемы, связанные с сильным искажением частотного состава питающего напряжения. Эти искажения гораздо труднее поддаются компенсации, чем привычные проблемы повышения коэффициента мощности. Перегрузка генерирующего оборудования и линий электропередач гармониками высокой кратности не менее опасна, чем перегрузка реактивной мощностью, а методы борьбы с такими явлениями гораздо более энергозатратны. Представляется очевидным, что на данном этапе развития энергетики становится экономически более выгодной структура внутрицехового электроснабжения, состоящая из централизованного мощного преобразователя промышленного трёхфазного тока в постоянный, внутрицеховой электросети постоянного тока и индивидуальных преобразователей постоянного тока в переменный. В статье описан фрагмент DC-системы электроснабжения групповых потребителей промышленного предприятия, содержащей два преобразовательно-распределительных устройства (ПРУ) мощностью по 3 кВт каждая с интеллектуальной системой управления. ПРУ должно обеспечивать преобразование трёхфазного переменного тока 380/220 В 50 Гц в постоянный 220/440 В с возможностью параллельной работы по шинам постоянного тока до 10 иерархически организованных устройств в режимах ведущего, ведомого и режиме пропорционального распределения нагрузки. Компьютерное моделирование подтверждает работоспособность экспериментального образца фрагмента DC-системы электроснабжения.

*Ключевые слова:* электроснабжение, постоянный ток, моделирование.

Modern technological equipment, driven by three-phase asynchronous motors, with a view to simplifying the kinematic scheme, improve performance and capacity, usually supplied with unit variable frequency drive, which allows you to smoothly and in a wide range of adjusting the rotational speed of the motor shaft and the shaft torque. Widespread frequency control leads to a noticeable change in the structural composition of electricity consumers and confronts manufacturers, suppliers and consumers new problems. The frequency converter is usually built on a two-stage scheme. The first stage is an AC to DC. Then the DC voltage is converted into AC (usually three-phase) and amplitude of the desired frequency. Industrial three-phase inverter DC load is fundamentally different, nonlinear nature, with these nonlinear parameters change over time. With the wide use of frequency converters for power supply of electric equipment of various problems related to the strong distortion of the frequency of the supply voltage. These distortions are much more difficult to compensate than usual problems of increasing the power factor. Overloading generating equipment and power lines harmonics of high multiplicity is not less dangerous than overloading reactive power, and methods of dealing with these phenomena are much more energy-intensive. It is evident that at this stage of development of power becomes more economical structure intrashop power supply consisting of a centralized industrial three-phase power converters DC, DC intrashop power and individual inverters DC to AC. This article describes a fragment of DC-power supply system of industrial enterprise consumer group containing 2

converting-distribution unit (CDU) with a capacity of 3 kW each with an intelligent control system. CDU must provide three-phase AC conversion 380/220 V 50 Hz to DC 220/440 V with parallel work on tires DC to 10 devices hierarchically organized as a master, slave mode and proportional load balancing. Computer simulation confirmed the experimental sample fragment DC-power systems.

*Keywords:* power supply, DC, modeling.

*Электротехника, 2015, №5*

**Математическое моделирование классической машины двойного питания с промежуточным ротором и конденсаторным самовозбуждением<sup>1</sup>**

ДЖЕНДУБАЕВ А.З.Р., БАРАХОЕВ Р.Ю., ДЖЕНДУБАЕВ Э.А.З.

Представлена новая конструкция генератора с промежуточным ротором на базе классической машины двойного питания. Короткозамкнутая обмотка промежуточного ротора расположена между статором и фазным ротором. Обмотка статора, обмотка фазного ротора и конденсаторы самовозбуждения соединены параллельно. Предложена математическая модель генератора в трехфазной заторможенной системе координат. Разработана SimPowerSystem модель с помощью расширений SimPowerSystem и Simulink системы Matlab. Проведен анализ переходных процессов при набросе нагрузки, конденсаторном самовозбуждении и коротком замыкании. Показано, что при несимметричной нагрузке промежуточный ротор подавляет высшие гармоники в кривой тока.

*Ключевые слова:* машина двойного питания, генератор, конденсаторное самовозбуждение, SimPowerSystems, MATLAB.

The new design of generator with intermediate rotor based on classic doubly fed machine is described. Short-circuited winding of intermediate rotor is located between the stator and wound rotor. The stator and wound rotor windings and self-excitation capacitors are connected in parallel. The mathematical model of the generator in the three-phase slowdown coordinate system is performed. A SimPowerSystem model was designed and built with the help of using SimPowerSystem and Simulink System of Matlab. The analyses of transitional processes under throwing on the load, capacitor self-excitation and short circuit were also carried out. It is shown that with an unbalanced load the intermediate rotor suppresses the upper harmonics in a current curve.

*Keywords:* doubly fed machine, generator, capacitor self-excitation, SimPowerSystem, MATLAB.

*Электротехника, 2015, №5*

**Проектирование электрических аппаратов с индукционными левитационными элементами**

АБДУЛЛАЕВ Я.Р., КЕРИМЗАДЕ Г.С., МАМЕДОВА Г.В., ПИРИЕВА Н.М.

Разработан обобщенный метод проектирования и систематизированы конструктивные схемы и функциональные зависимости основных разновидностей электрических аппаратов (ЭА) левитационными элементами (ЛЭ). Рассмотрены их основные технические показатели. Введены понятия коэффициентов индукционной левитации и кратности сил, найдены их оптимальные значения. Установлено, что в момент подключения обмотки возбуждения к источнику питания по обмотке и левитационному элементу протекают токи, значительно превышающие номинальные значения. При этом резко возрастают потери в левитационном элементе, тогда как теплоотдача увеличивается незначительно и вся выделяемая в левитационном элементе энергия идет на его нагревание. В результате ЛЭ может расплавиться в самом начале движения, не успевая прийти к установившемуся положению. Получено аналитическое выражение для коэффициента индукционной левитации как функции размеров магнитопровода и коэффициента кратности силы, физико-технических характеристик материала левитационного элемента и заданной температуры перегрева. Составлена математическая модель, основанная на параметрах режимов тока и усилий, в которую включены уравнения магнитной, электрической, механической и тепловой цепей магнитной системы, откуда определены безразмерные величины и главные размеры магнитной системы. Для ЛЭ из меди и алюминия определены численные значения безразмерных величин, на основе которых составлены справочные таблицы, необходимые для

проектирования ЭА с ЛЭ. Полученные аналитические выражения для главных размеров учитывают заданные значения температуры перегрева обмоток, входных и выходных параметров и условие выполнения однородности магнитного поля в рабочем воздушном зазоре. Определены оптимальные значения размеров магнитопровода, при которых периметр поперечного сечения среднего стержня минимален. При этом активные сопротивления обмотки возбуждения и левитационного элемента также будут минимальными, что приводит к минимизации потерь активных мощностей.

*Ключевые слова:* электрические аппараты с левитационными элементами, режимы тока и усилий, проектирование, ступенчатая магнитная система, математическая модель, тепловая стойкость.

The generalized method of design is developed and constructive schemes and functional dependences of the main versions ED with LE are systematized. Their main technical indicators are reviewed. Concepts of coefficients of an induction levitation and frequency rate of forces are for this purpose entered, their optimum values are found. It is established that at the time of connection of a winding of excitement to the power supply on a winding and a levitation element the currents much exceeding nominal rates start proceeding. Thus losses sharply increase in a levitation element whereas the thermolysis increases slightly and all energy emitted in a levitation element goes for its heating. Depending on the geometrical sizes of a levitation element temperature of the last can reach so big size that the levitation element to melt in the start of motion, without managing to reach the established situation. Analytical expression of coefficient of an induction levitation as function of the geometrical sizes of a magnetic conductor and coefficient of frequency rate of force, physics and technology characteristics of material of a levitation element and the set overheat temperature are received. The mathematical model based on parameters of the modes of current and efforts is made. The mathematical model included the equations of magnetic, electric, mechanical and thermal chains of magnetic system. From mathematical model dimensionless sizes and the main sizes of magnetic system are determined. For LE from copper and aluminum numerical values of dimensionless sizes on the basis of which the help tables necessary for design of ED with LE are made are defined. The received analytical expressions for the main sizes consider preset values of temperature of an overheat of windings, input and output parameters and a condition of performance of uniformity of a magnetic field in a working air gap. Optimum values of the sizes of a magnetic conductor at which the perimeter of cross section of an average core gains the minimum value are defined. In this case active resistance of a winding of excitement and a levitation element will also be minimum. It leads to minimization of losses of active capacities.

*Keywords:* electric devices with levitation elements, modes of current and efforts, design, step magnetic system, mathematical model, thermal firmness.

*Электротехника, 2015, №5*

#### **Исследование динамики ВЭУ, оснащенных синхронными генераторами с постоянными магнитами**

МУСТАФАЕВ Р.И., ГАСАНОВА Л.Г.

При резких порывах ветра на лопасти ветродвигателя ветроэлектрической установки (ВЭУ) действуют значительные силы, создавая скачки вращающего момента на валу установки. При работе ветроэлектрической установки на электрическую сеть такой режим создает угрозу нарушения динамической устойчивости системы. Предложена приближенная к реальным флюктограммам изменения скоростей ветра, структура модели скорости ветра, которая позволяет устанавливать различные значения скоростей нарастания и спада ветрового потока, максимальное значение порыва ветра, а также значения скоростей ветра до начала и после порыва ветра. Приведена система уравнений, составляющая математическую модель частотно-управляемого синхронного генератора с постоянными магнитами, который является электромеханическим преобразователем в ВЭУ. Проведенные на этих моделях исследования определили условия, при которых система динамически устойчива при различных значениях и формах возмущающего воздействия, инерционной постоянной и электромагнитной связи статорных и роторных контуров генератора. Исследования позволили оценить влияние магнитной

энергии постоянных магнитов синхронного генератора ВЭУ на динамическую устойчивость. Выявлено, что при большем значении магнитной энергии постоянных магнитов на единицу объема при неизменных значениях активных мощностей генераторов увеличивается их динамическая устойчивость. Выявлено также, что наиболее приемлемым способом повышения динамической устойчивости синхронных генераторов ВЭУ с постоянными магнитами является быстрое снижение частоты тока статора генератора во время порыва ветра до определенного значения с дальнейшим его восстановлением до исходного значения после окончания порыва скорости ветра.

*Ключевые слова:* ветроэлектрические установки, скорость ветра, математическая модель, динамический режим, синхронные генераторы с постоянными магнитами, обмотка возбуждения, дифференциальные уравнения.

Sudden gusts of wind exert significant forces on the blades of a wind turbine of wind power unit (WPU), creating a torque leap on the shaft of the unit. When operating a wind power unit on the grid, such a regime threatens to distort the dynamic stability of the system. Suggested close to real fluctogram change of wind speed, structure of the wind velocity model, which allows to set the difference speed value rise and fall of the wind flow, the maximum value of a gust of wind, and the wind speed before and after a gust of wind. Also system of equations constituting a mathematical model of a synchronous generator with permanent magnets, which is an electromechanical transducer in wind turbines were shown. Conducted research on these models define the conditions under which the system is dynamically stable for different values and forms of the perturbing actions of inertial constant and electromagnetic coupling of stator and rotor generator circuits. Study allowed us to estimate the influence of the magnetic energy of permanent magnet synchronous generator of wind turbine on the dynamic stability. Revealed that the larger value of the magnetic energy of permanent magnets per unit volume at constant values of generators active power would increase its dynamic stability. It was also revealed that the most reasonable way to improve the dynamic stability of synchronous generator with permanent magnet of wind turbine, is the rapid frequency decrease of the generator stator current during a gust of wind to a certain value, with a further frequency increase to its original value after a gust of wind speed.

*Keywords:* wind power plant, wind speed, mathematical model, dynamic regime, synchronous generators with permanent magnets, field coil, differential equation.

*Электротехника, 2015, №5*

#### **Построение электроприводов переменного тока с пониженным уровнем шумов**

АНАНЬЕВ С.С., ГОЛУБЕВ А.Н., МАРТЫНОВ В.А., КАРАЧЕВ В.Д., АЛЕЙНИКОВ А.В.

Снижение уровня шумов и вибраций современного электропривода является одной из важнейших задач при его разработке. Методы решения данной задачи в рамках традиционных трехфазных электромеханических систем достаточно хорошо изучены, однако во многом исчерпали себя. Одним из перспективных вариантов построения электропривода переменного тока, как асинхронного, так и синхронного, с улучшенными виброшумовыми характеристиками является его реализация на основе исполнительного двигателя с увеличенным числом фаз. Снижение шумов и вибраций путем применения многофазных машин ( $m > 3$ ), с одной стороны, обусловлено уменьшением тангенциальных сил, вызванных пульсациями электромагнитного момента двигателя. Это связано с тем, что увеличение числа фаз статорной обмотки вызывает разрежение гармонического состава поля в воздушном зазоре и устранении из него асинхронных гармоник при относительном возрастании синхронных. С другой стороны, увеличение числа фаз существенно расширяет возможности снижения уровня шумов за счет снижения радиальных магнитных сил, действующих между статором и ротором и вызывающих динамические деформации статорного кольца. Предложены методики оптимизации виброшумовых характеристик асинхронного и синхронного электроприводов, а также реализующие их структуры систем управления. Приведены результаты исследований многофазных электромеханических систем, демонстрирующие эффективность предложенных решений.

*Ключевые слова:* многофазный электропривод переменного тока, асинхронный и синхронный двигатели, виброшумовые характеристики, тангенциальные и радиальные силы, магнитная индукция, спектральный вектор.

One of the most significant tasks in design process of a modern electrical drive is how to reduce its noise and vibration. Methods solving this problem in the framework of traditional three-phase electromechanical systems are well studied and have largely exhausted themselves. One of the promising options to construct an AC electrical drive with improved vibronoise characteristics, both asynchronous and synchronous, is to implement an executive drive with increased number of phases. On the one hand, the reduction of noise and vibrations through the application of multiphase machines ( $m > 3$ ) results from decrease in tangential forces caused by pulsation of the electromagnetic torque of the engine. Increasing the number of phases of stator windings causes depression of harmonic content of the field in the air gap directed to resolve asynchronous harmonics with a relative increase in synchronous harmonics. On the other hand, increasing the number of phases greatly enhances noise reduction capabilities by reducing the radial magnetic forces acting between stator and rotor and causing the dynamic deformation of the stator ring. Certain optimization techniques to improve vibronoise characteristics of asynchronous and synchronous electric drives are proposed and their structure control systems are suggested to implement the described option. The results of studies of multi-phase electromechanical systems demonstrating the effectiveness of the proposed solutions are given.

*Keywords:* multiphase electric AC drive, synchronous and asynchronous motors, vibronoise characteristics, tangential and radial forces, magnetic induction, spectral vector.

*Электротехника, 2015, №5*

#### **Создание ударного контура возбуждения импульсного резонансного преобразователя мощности**

МЕНАКЕР К.В., ЦВЕТАЕВА А.С.

Проанализирована возможность получения высокочастотных импульсов тока наносекундной длительности и значительной амплитуды от первичного маломощного низковольтного источника энергии, область использования которых весьма широка: от альтернативных источников энергии малой и средней мощности до высокоэффективных индукционных установок плавки и закалки металлов, включая синтез наноструктурированных покрытий. Рассмотрена функциональная схема классического ударного контура возбуждения, принцип работы которого основан на получении значительной импульсной мощности на индукторе за счет его насыщения до значительных значений тока за малый промежуток времени с минимальными затратами.

Проанализированы причины ограничения амплитуды тока на индукторе в схеме ударного контура возбуждения и предложены способы устранения недостатков на примере схемы с реальными электронными компонентами. Выполнен анализ работы ударного контура возбуждения и рассмотрены варианты технической реализации устройства с оптимальными параметрами.

*Ключевые слова:* ударный контур возбуждения, коммутатор, индуктор, накопительная емкость, источник тока.

In this article possibility of receiving high-frequency impulses of current of nanosecond duration, considerable amplitude from primary low-power low-voltage power source which area of use is very wide is analysed: from alternative energy sources of low and average power before highly effective induction installations of melting and training of metals, including synthesis of the nanostructured coverings. Article is devoted to research of a function chart of a classical shock contour of excitement which principle of work is based on obtaining considerable pulse power on the inductor due to its saturation to considerable values of current for a small period with the minimum expenses. In work the reasons of restriction of amplitude of current on the inductor in the scheme of a shock contour of excitement are analysed and ways of elimination of these shortcomings on the example of the scheme with real electronic components are offered. The mathematical analysis

of work of a shock contour of excitement is carried out and options of technical realization of the device with optimum parameters are considered.

*Keywords:* shock contour of excitement, switchboard, inductor, accumulative capacity, current source.

*Электротехника, 2015, №5*

#### **Определение параметров грунта для расчета его удельного электрического сопротивления**

ЗАЙЦЕВА Н.М., ИСАБЕКОВА Б.Б., КЛЕЦЕЛЬ М.Я.

Статья посвящена разработке методик, позволяющих уточнить проектные решения по заземляющим устройствам. При проектировании устройств заземления используется удельное электрическое сопротивление, которое зависит от влажности, температуры и плотности грунта. Для определения влажности грунта на глубинах его залегания представлены две модели: в зависимости от времени года, на глубинах до 1 м и в зависимости от уровня грунтовых вод, на глубинах больше 1 м. Модели разработаны на основе использования нечеткой логики, данных метеостанций и геологоразведки. Для определения температуры слоев грунта в течение года и расчета удельного электрического сопротивления грунта приведены методика и соответствующие зависимости. Моделирование температуры выполнялось на основе теории теплопроводности Фурье и данных метеостанций. Показано, что эти методы и зависимости позволяют более точно рассчитать сопротивления заземлителей на этапе проектирования. Представлены полученные в лабораторных условиях зависимости удельного сопротивления грунта от его влажности и плотности, которые дают возможность уточнить динамику изменения сопротивления заземляющих устройств с момента их установки до полного оседания грунта.

*Ключевые слова:* заземляющие устройства, грунт, удельное электрическое сопротивление грунта, температура, влажность, плотность, нечеткая логика.

The article is devoted to the development of techniques that are allowing us to specify design decisions on grounding devices. At design of the grounding devices specific electric resistance, is usually used, which depends on humidity, temperature and density of the soil. For determination of humidity of soil at depths of its bedding two models are presented: the first one – seasonally, is at depths of up to one meter, the second one – depending on the level of ground waters, is at depths below one meter. Models have been developed on the basis of use of fuzzy logic, for these meteorological stations and geological explorations. The technique and dependences are given for soil layers temperature determination, within a year and calculation of their specific electric resistance from  $t$  and  $v$ . Modeling of temperature of  $t$  was carried out on the basis of the theory of heat conductivity of Fourier and meteorological stations data. The article demonstrates that these methods and dependences allow us to calculate more precisely the resistance of grounding conductors at a design stage. They are presented, received in vitro, dependences  $c$  soil from its humidity and density which give the chance to specify dynamics of resistance change of the grounding devices from the moment of their installation before full land subsidence.

*Keywords:* s grounding devices, soil, specific electrical resistance of the soil, temperature, humidity, density, fuzzy logic.

*Электротехника, 2015, №5*

#### **Определенность действительной и мнимой частей комплексных матриц электрической сети**

МОЛОДЦОВ В.С., МОЛОДЦОВ М.В.

Для решения ряда оптимизационных электроэнергетических задач необходимо знать определенности матриц электрической сети, входящих в квадратичные формы целевых функций и определяющих их свойства. Для обоснования определенности матрицы используются два критерия, один из которых основан на вычислении собственных значений матрицы, другой – на вычислении последовательности главных миноров детерминанта вещественной симметричной матрицы. В статье предложено теоретическое обоснование определенности действительной и мнимой частей комплексных матриц электрической сети с использованием главных миноров

детерминантов матриц. Для положительной определенности матрицы необходимо и достаточно выполнение детерминантного критерия положительной определенности Сильвестра, для отрицательной определенности – выполнение неравенства, ряд членов которого, являющихся главными минорами детерминанта вещественной матрицы, имеют отрицательное значение. Доказательства даны для действительной и мнимой частей комплексных матриц узловых сопротивлений. В основу доказательств положен способ нахождения последовательности главных миноров детерминанта, в котором при вычислении последующего главного минора детерминанта используется значение предыдущего.

*Ключевые слова:* электрическая сеть, действительная часть матрицы, мнимая часть матрицы, детерминант, обратная матрица, определённость матриц.

To solve some problems of optimization of electric power is necessary to know definite matrix mains belonging to the quadratic forms of the objective functions and determine their properties. To justify the definiteness of the matrix used two criteria. One criterion is based on the computation of eigenvalues and the other on the calculation of the sequence of principal minors of the determinant of a real symmetric matrix. The purpose of the article – a theoretical justification of the determination of the real and imaginary parts of complex matrices mains using the principal minors of the matrix determinant. For a positive definite matrix if and only if the determinant criterion for the positive definiteness of Sylvester. For negative definite matrix if and only if the inequality, some members of which are the principal minors of the determinant of a real matrix have a negative value. Proofs are given for the real and imaginary parts of complex matrices centers of resistance. The basis of the evidence put to a method for finding the sequence of principal minors of the determinant in which the calculation of the following principal minor determinant of the value of the previous.

*Keywords:* electric network, the real part of matrix, the imaginary part of the matrix, determinant, the inverse matrix, definition of the matrix.

*Электротехника, 2015, №5*

#### **Оценка возможностей улучшения эксплуатационных показателей поездов метрополитена**

ВЕСЕЛОВ П.А., ТУЛУПОВ В.Д.

Рассмотрена проблема применения рекуперации в метрополитене и повышения энергоэффективности вагонов метрополитена. Актуальность проблемы энергоэффективности в метрополитене определяется тем, что метрополитен сам по себе является крупным потребителем энергии, существенная часть которой используется на тягу электропоездов. Для реализации предложений по снижению энергопотребления метрополитена рассмотрен проект, разработанный на кафедре «Электрический транспорт» ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ». Приведена оценка эффективности применения рекуперативного торможения при модернизации вагонов 82717/14 с заменой привычного реостатного контроллера на управление биполярными транзисторами с изолированным затвором. Приведен расчет оценки эффективности применения рекуперации для разрабатываемого состава.

*Ключевые слова:* метрополитен, рекуперация, биполярные транзисторы с изолированным затвором, энергетическая эффективность, модернизация вагонов метрополитена.

The paper considers the problems of the implementation of recuperation and energy efficiency in underground trains. Actuality of energy efficiency for underground rail trains based on the fact that the average part of the electricity used by the rail trains is used for electric traction. The text discusses a project developed in National Research University «Moscow Power Engineering Institute» at the Department of electrical transport. The paper presents the results in the proposal of using breaking energy recuperation by using microprocessor control system for controlling the traction motor drive, as well as replacing the usual rheostat controller for bipolar transistors with insulated gate in underground trains 82717/14 type. As the simulation project provides an analytical calculation of the assess of recovery effectiveness for the developed underground train, provides the assessments of the positive and negative aspects of this project.

*Keywords:* underground trains, breaking energy recovery, insulated gate bipolar transistors, energy efficiently, underground trains upgrading.

*Электротехника, 2015, №5*

### **Мощные преобразователи с резонансной коммутацией на стороне постоянного тока**

ВОРОНИН П.А., ВОРОНИН И.П.

Представлены новые способы реализации резонансной коммутации на стороне постоянного тока мощных преобразователей, которые позволяют существенно сократить энергию динамических потерь при минимальном количестве дополнительных элементов. Эти способы реализованы на базе концепции резонансного ключа (РК) путем интеграции его структуры во входную цепь преобразователя. В инверторах напряжения применены резонансные ключи первого и третьего типа, переключаемые при нулевом напряжении и ключи второго типа, переключаемые при нулевом токе. В инверторах тока применены дуальные варианты резонансных ключей.

Рассмотрены базовые варианты, в которых резонансная цепь имеет непосредственную связь с источником входного напряжения или тока, а также схемы преобразователей с дополнительным ключом. Во всех вариантах используется активное управление резонансным процессом, который синхронизирован с ШИМ управлением ключевыми элементами преобразователя.

*Ключевые слова:* резонансный ключ, резонансный дроссель, резонансный конденсатор, инвертор напряжения, инвертор тока.

Here is the new implementation of the DC – side resonant switching power converters, which can significantly reduce the loss of dynamic energy with a minimal amount of additional elements. These methods are implemented on the basis of resonant switching concept by integrating its structure in the input circuit of the inverter. In source voltage inverters was applied resonant switches of the first and third type, switched at zero voltage, and resonant switches of the second type, switched at zero current). In the source current inverters applied dual resonance switch options. Describes the basic variants in which a resonant circuit has a direct connection with the input voltage or current source, as well as the converter circuit with an additional switch. In all variants used active control resonant process which is synchronized with the PWM control of switch elements of the converter.

*Keywords:* resonant switch, resonant inductor, resonant capacitor, voltage inverter, current inverter.

*Электротехника, 2015, №5*

### **Структурно-параметрический синтез и оптимизация регуляторов селективно-инвариантных электромеханических систем с гармоническим моментом нагрузки**

ТАРАРЫКИН С.В., КОПЫЛОВА Л.Г., ТИХОМИРОВА И.А.

Методами модального управления выполнен структурно-параметрический синтез и сделана комплексная оценка показателей качества раз личных вариантов астатических электромеханических систем, построенных на основе сочетания принципа внутренней модели гармонического возмущения (селективной инвариантности) с другими принципами теории управления – каскадным регулированием, подчиненным регулированием с последовательной коррекцией, регулированием состояния, полиномиальным регулированием по выходу, разделением темпов движения. Предложена методика сравнения и структурной оптимизации систем, синтезированных сочетанием перечисленных методов, по заданному комплексу основных и дополнительных критериев качества: отработка постоянной и гармонической составляющей возмущений по моменту нагрузки, диапазону возможных вариаций момента инерции механической части, уровню пульсаций выходного сигнала скорости при наложении помехи в канале его измерения, максимальному значению времени задержки сигналов в силовом преобразователе, при котором система сохраняет устойчивость, а также суммарный порядок динамических звеньев регуляторов. Показано как перераспределяются акценты на определенные критерии качества, наиболее важные для проектировщика, при использовании того или иного



сочетания принципов построения систем, что дает возможность обоснованно выбрать наиболее эффективное структурное решение.

*Ключевые слова:* электромеханическая система, компенсация гармонических возмущений, принцип внутренней модели, синтез и структурная оптимизация регуляторов, селективная инвариантность.

Structural-parametric synthesis of different types of astatic electromechanical systems, which are built on the basis of combination of harmonic disturbance internal model principle (selective invariance) with other principles of control theory, is implemented by the use of modal control methods. These principles are cascade control, subordinate control with series correction, state control, polynomial output control, motion rates separation. Complex assessment of quality factors of these systems is implemented. Assessment factors are response quality of constant and harmonic components of load torque disturbances, acceptable variations range of inertia moment of system mechanical part, pulsations level of output speed signal when the noise is on its measuring channel, maximum value of signals time delay in power converter when the system is stable and the total degree of regulator dynamic blocks as well. Methods of comparison and structural optimization of such systems, synthesized by the combination of listed methods, by using the assigned complex of the main and the additional quality factors is offered. The obtained results enable to demonstrate the way the appointed quality factors are underlined when designer uses the combination of different principles of the system design. It allows to make the proper choice of the most efficient control structure.

*Keywords:* electromechanical system, harmonic disturbance compensation, internal model principle, synthesis and structural optimization of control devices, selective invariance.