

**Анализ динамических режимов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе при различных структурах и алгоритмах управления**  
**АЛЕКСЕЕВ В.В., ЕМЕЛЬЯНОВ А.П., КОЗЯРУК А.Е**

Выполнен сравнительный анализ динамических характеристик системы векторного управления асинхронным приводом с опорным вектором главного магнитного потокосцепления, электропривода с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения инвертора (SVPWM) и электропривода с прямым управлением моментом (DTC), с использованием пакета Matlab/Simulink, при одних и тех же параметрах модели асинхронного двигателя. Переход от системы с непрерывными законами векторного управления к использованию микропроцессоров, современных управляемых преобразователей частоты с релейным принципом управления связан с возможным изменением свойств электропривода. В связи с этим поставлена задача сравнить динамические показатели системы подчиненного векторного управления (с идеализированным преобразователем частоты) (ЭП1), электропривода с системой управления DTC (ЭП2) и электропривода с непосредственным управлением моментом (ЭП3). Моделирование показывает, что во всех рассмотренных системах управления быстродействие контура регулирования моментом одинаково. Задержка срабатывания не превышает 0,01 с. В целом переходные процессы по скорости в указанных системах протекают одинаково. Имеющиеся отличия переходных процессов по потокосцеплению ЭП2 и ЭП3 по сравнению с ЭП1 связаны со способом формирования электромагнитного момента. В этих системах управления не ставится задача стабилизировать модуль потокосцепления. При малых нагрузках потокосцепление автоматически отслеживает нагрузку. В электроприводе ЭП3 с непосредственным управлением моментом вычисление требуемых мгновенных значений проекций вектора напряжения и формирование напряжения на двигателе на основе SVPWM позволяет иметь быстродействующую систему управления электроприводом с минимальными гармоническими искажениями тока и пульсаций момента. Коэффициенты системы управления рассчитываются заранее. Регулятор скорости настраивается на технический оптимум. В векторной системе управления с ориентированием по главному потокосцеплению также желательно применить формирование напряжения двигателя на основе SVPWM.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель; векторное управление; вектор главного магнитного потока; способ формирования выходного напряжения инвертора; прямое управление моментом.

A comparative analysis of the dynamic characteristics of the vector control system of asynchronous drive with a support vector of the main magnetic flux (SPVU) electric drive with space vector PWM inverter output voltage (SVPWM) and electric drive with direct torque control (DTC), using package Matlab/Simulink at the same parameters of the model of the induction motor is made. The transition from a system with a continuous vector control to the use of microprocessors, advanced controlled frequency converters and relay management principles associated with possible changes in the properties of the drive. In this regard, the task of comparing the dynamic performance of the slave vector control (with an idealized

frequency converter) (EP1) electric drive with DTC (EP2) and the motor with direct torque control with SVPWM (EP3). Simulations show that in all the control systems performance loop torque equally. Trip delay does not exceed 0,01 s. In general, transient speed in these systems take place equally. Existing differences transient flux current in EP2 and EP3 compared to the EP1, a method for generating an electromagnetic torque. In these systems, the control does not attempt to stabilize the unit flux. At low loads linkage automatically keeps track of the load. Although it should be noted that the decrease in flux vector system is not a problem. The drive EP3 with direct torque control calculation of the instantaneous values ??of the desired voltage vector projections and the formation of stress on the engine, based on SVPWM allows you to have a highspeed motor control system with minimal harmonic distortion of current and torque ripple. The coefficients of the control system are calculated in advance. The speed controller is adjusted to a technical optimum. In the vector control system with the orientation of the main flux current it is also desirable to apply the formation of motor voltage based on SVPWM.

**Key words:** induction motor; vector control; vector of the main magnetic flux; method of generating an output voltage of the inverter; direct torque control.

#### **Алгоритм управления электромагнитным приводом воздушно-тактового клапана двигателя внутреннего сгорания**

**ПАВЛЕНКО А.В., ГУММЕЛЬ А.А., БАТИЩЕВ Д.В., БАУМБАХ Е.**

Предложен адаптивный алгоритм управления быстродействующим электромагнитом привода воздушно-тактового клапана (ВТК) двигателя внутреннего сгорания (ДВС) без использования специализированных датчиков положения и скорости. Применение ВТК обеспечивает создание волновых явлений в системе впуска путем быстрого открытия и закрытия впускного канала клапаном ВТК, обеспечивая при этом резонанс в системе цилиндр–впускной коллектор во всем диапазоне частот вращения ДВС. Клапан с электромагнитным приводом устанавливается непосредственно перед впускным клапаном ДВС и управляется системой управления, обеспечивающей требуемые динамические характеристики привода в условиях внешних воздействующих факторов. Существующие системы и методы управления для обеспечения требуемых динамических характеристик в условиях внешних воздействующих факторов предполагают использование специализированных датчиков положения или скорости, что приводит к усложнению системы, росту массогабаритных и стоимостных показателей, снижает надежность системы в целом. Для анализа динамики работы электромагнитного привода и методов управления разработана комплексная математическая модель мехатронного привода ВТК. Предложен способ управления, позволяющий косвенно определять пространственное положение и скорость якоря в момент подхода к полюсу в режиме реального времени по характеру изменения тока в обмотках и напряжения на них, с учетом всех дестабилизирующих факторов. Приведены результаты исследования влияния скорости якоря электромагнита на уровень «токового провала», а также влияние тока подхвата на скорость посадки якоря. Описан способ определения времени трогания якоря по изменению напряжения на управляющей обмотке электромагнита. Эксперименты показали, что применение предложенного алгоритма управления позволяет обеспечить

конечную скорость посадки клапана менее 0,4 м/с при времени переключения порядка 34 мс и тем самым подтвердили эффективность предложенного алгоритма.

**Ключевые слова:** алгоритм управления, электромагнитный привод, воздушно-тактовый клапан, двигатель внутреннего сгорания.

The article discusses the development of the adaptive control algorithm fast acting electromagnetic actuator Air Pulse Valve (APV) the internal combustion engine without the use of specialized position and velocity sensors. Application of air pulse valve allows you to increase the clock filling of cylinders, improve mixture formation and combustion processes, resulting in lower emissions. combustion processes, resulting in lower emissions. The method consists in the creation of wave phenomena in the intake system by quickly opening and closing the intake valve channel APV, while providing a resonance in the intake manifold, cylinder around the engine speed range. APV with electromagnetic actuator is mounted directly in front of the intake valve of the engine and controlled by a dedicated control system, providing the required dynamic characteristics of the actuator under external factors. Existing systems and methods of control to provide the required dynamic characteristics in terms of external influencing factors, involve the use of specialized sensor position or velocity of the armature, which leads to complication of the system, increased weight and size and cost performance, reduces system reliability. To analyze the dynamics of the operation of the magnetic actuator and control methods, it has developed a comprehensive mathematical model of mechatronic actuator of APV. As a result, mathematical research has been proposed a control method that allows indirectly determine the spatial position and velocity of the armature at the approach to the pole, in real time, on the nature of change of current in the windings and the voltage across them, with all the destabilizing factors. The article presents the results of a study on the armature speed value «current collapse», as well as the impact of the current pickup in the landing speed of the armature. It describes a method for determining the time of pickanchor changes the voltage on the control winding of the electromagnet. The experimental results showed that the application of the proposed control algorithm enables the final landing speed valve less than 0.4 m/s at the time of switching the order of 34 ms, and thus confirmed the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** control algorithm, electromagnetic actuator, air pulse valve, internal combustion engine.

### **Исследование магнитных систем ротора высокоскоростных электромеханических преобразователей энергии**

**ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ХАЙРУЛЛИН И.Х., ПОЛИХАЧ Е.А., ВАВИЛОВ В.Е.**

Представлены результаты исследования магнитных систем ротора высокоскоростных электромеханических преобразователей энергии в программном комплексе Ansoft Maxwell с последующей экспериментальной проверкой. Рассматривались две магнитные системы: с полукруглыми и цилиндрическими постоянными магнитами. Установлено, что магнитная система с полукруглыми постоянными магнитами позволяет создать электромеханический преобразователь энергии с меньшей плотностью тока в обмотках и

меньшим уровнем потерь при одинаковых массогабаритных показателях. Кроме того, магнитная система ротора с полукруглыми постоянными магнитами позволяет снизить механические напряжения в бандажной оболочке ротора и, соответственно, ее механические расширения в процессе эксплуатации. Рассмотрен пример выбора числа пар полюсов высокоскоростных электрических машин с постоянными магнитами, для чего были выполнены предварительные расчеты потерь в магнитопроводе с заданными параметрами при различном числе полюсов.

**Ключевые слова:** высокоскоростные электромеханические преобразователи энергии; магнитная система ротора, высококоэрцитивные постоянные магниты.

Presentation of the study of magnetic systems of highspeed rotor electromechanical energy converters in the software package Ansoft Maxwell followed by experimental verification. In studies examined two magnetic systems: the U-shaped permanent magnet and coil. As a result of studies it was established that the use of a magnetic system with permanent magnet semicircular creates an electromechanical energy converter with the lower current density in the windings and a low loss at the same weight and dimensions. Application of the magnetic system of the rotor with a semicircular permanent magnet reduces the mechanical stresses in the shroud and rotor shell, respectively, the mechanical expansion of the shroud during operation of the shell that have been analyzing it using a software package Solid Works. The article also presented a numerical example select number of pole pairs of high-speed electrical machines with permanent magnets. To select the number of pole pairs of high-speed generator were the product of the preliminary estimates of losses in the magnetic circuit, with preset parameters for different numbers of poles.

**Key words:** highspeed electromechanical energy converters; magnetic rotor system, highcoercivity permanent magnets.

### **Моделирование токов в обмотках синхронного компенсатора при витковом замыкании в обмотке статора**

**НОВОЖИЛОВ А.Н., ГОРЮНОВ В.Н., НОВОЖИЛОВ Т.А., АКАЕВ А.М.**

Предложен метод моделирования виткового замыкания в обмотке статора в стационарных режимах синхронного компенсатора, основанный на использовании математической модели, уравнения которой составлены по методу контурных токов для междуфазных напряжений. Предложены математические выражения для активных и индуктивных сопротивлений элементов обмоток математической модели, в которых активные сопротивления и данные для расчета индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора определяются экспериментально. Экспериментально установлено, что предложенный метод с погрешностью не более 5–10% позволяет моделировать токи в обмотках статора и ротора при замыкании витков в обмотке статора.

**Ключевые слова:** синхронный компенсатор, математическая модель, стационарный режим работы, витковое замыкание, сопротивления статора и ротора.

There was developed a simulation method of coil circuit in the stator winding in the steady state synchronous compensator, based on the use of mathematical models, equations which

are composed of mesh analysis for line to line voltages. There were suggested the mathematical expressions to determine the active and inductive resistance of the element coils of a mathematical model, in which the active resistance and data for the calculation of the inductances of stator and rotor windings are determined experimentally. There was established experimentally that the proposed method with an accuracy of 5–10% allow to simulate the currents in the stator windings and rotor windings during coil closing in the stator winding.

**Key words:** synchronous compensator, mathematical model, steady operation mode, inter winding fault, resistance of stator and rotor.

### **Вентильный электродвигатель с поперечным магнитным потоком и дисковым ротором КАЛМЫКОВ А.Н., СЕНЬКОВ А.А., СЕНЬКОВ А.П., РЯБОВ А.А.**

Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами на роторе (ВДПМ) имеют максимальный КПД и минимальные габариты по сравнению с другими видами машин и широко применяются в электроприводах различного назначения. На практике используются два вида ВДПМ – ВДПМ с классической двухслойной, распределенной обмоткой статора и ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора. Существует еще один вид ВДПМ – с поперечным магнитным потоком (Transverse Flux Motors –TFM), который пока находится на стадии исследований. В электродвигателях TFM силовые линии магнитных потоков полюсов ротора замыкаются перпендикулярно (поперек) направлению вращения ротора. Обмотки статора в этих машинах выполняются в виде колец, соосных с ротором, а магнитопровод статора состоит из отдельных фрагментов. По оценкам специалистов электродвигатели TFM имеют более высокую удельную мощность – отношение выходной мощности к массе машины, чем электродвигатели других видов, и представляют интерес, прежде всего для электроприводов без редукторов. В большинстве электродвигателей TFM с кольцевыми фазами статора связан магнитный поток только половины полюсов ротора. В статье описана конструкция электродвигателя TFM с дисковым ротором, в которой с кольцевыми фазами статора связан магнитный поток всех полюсов ротора. Магнитопровод статора этой машины состоит из П-образных элементов, и чередование полярности элементов достигается за счет изменения положения П-образных элементов. В результате магнитный поток, связанный с кольцевой фазой, возрастает в два раза и соответственно возрастает момент и мощность машины. Приведены некоторые результаты моделирования трехфазного электродвигателя TFM, полученные в пакете Ansys Maxwell, в том числе график изменения момента на валу машины при вращении ротора и синусоидальных токах в фазах.

**Ключевые слова:** вентильные электродвигатели, электродвигатели с поперечным магнитным потоком, машина с дисковым ротором.

Brushless permanent magnet machines (BPMM) have maximum efficiency and minimum overall dimensions compared with other types of machines and are widely used in electric drives for various purposes. Two types of BPMM are used in practice – BPMM with the classic double layer, up diffused winding of stator and BPMM with the tooth step of puttee of stator. There is another type of BPMM – with a transversal magnetic stream (Transverse Flux Motors –

TFM) that while is on the stage of researches. In the electric motors TFM the lines of force of magnetic streams of poles of the rotor are locked athwart (broad-wise) to the direction of the rotation of rotor. Windings of stator in these machines are executed as coaxial rings with a rotor, and magnetic circuit of stator consists of separate fragments. On the estimations of the specialists of the electric motors of TFM have higher specific power – attitude of launch power toward mass of machine, thanelectric motors TFM have higher specific power – attitude of launch power toward mass of machine, what electric motors of other kinds, and are of interest, foremost for the electric drives without reducing gears. In most electric motors of TFM to the circular phases of stator a magnetic stream is related only halves of poles of rotor. In the article the construction of electric motor of TFM is described with a disk rotor, in that to the circular phases of stator the magnetic stream of all poles of rotor is related. Magnetic circuit of stator of this machine consists of Пlike elements, and alternation of polarity of elements is arrived at due to the change of position of Пlike elements. As a result, – the magnetic stream related to the circular phase increases in two times and a moment and power of machine increase accordingly. Some results over of design of three-phase electric motor TFM got in Ansys Maxwell batch are brought, including chart of change of the moment on the billow of machine at the rotation of rotor and sinewave currents in phases.

**Key words:** brushless permanent magnet machines, transverse flux motors, machine with a disk rotor.

**Быстроходные синхронные машины: расчётный комплекс для исследования влияния радиального эксцентриситета ротора на электромагнитные усилия**

**БОГУСЛАВСКИЙ И.З., КРУЧИНИНА И.Ю., ЛЮБИМЦЕВ А.С., ХОЗИКОВ Ю.Ф., ПАЛЬЦЕВА В.В.**

Рассмотрена задача создания современных подшипников (магнитных, газовых и др.) для быстроходных машин с широким диапазоном мощностей (от десятков киловатт до мегаватт) и частот вращения (от 6000 до 60000 об/мин), применяемых в нефте- и газодобыче, робототехнике, космической технике, минигазотурбинных установках. Проведено исследование распределения усилий, приложенных к валу ротора в различных эксплуатационных режимах, в том числе и при возникновении эксцентриситета вала. При эксплуатации эксцентриситет не должен превышать 5%. Вычислительный комплекс, основан на численном методе расчёта поля (2D) в активной части машины. Распределение усилий рассмотрено с учётом насыщения магнитной цепи машины и гармонического состава потока взаимоиндукции (потока в зазоре). При расчёте этих усилий в режиме холостого хода предусматривалось, что в машинах с постоянными магнитами на роторе поток взаимоиндукции примерно на 10–15% больше, чем при номинальной нагрузке из-за размагничивающего воздействия реакции якоря; поток взаимоиндукции уточнялся в зависимости от типа магнитов на роторе. В вычислительном комплексе учитывалось взаимное положение полюсов ротора относительно поля реакции статора в режимах при нагрузке (угол нагрузки  $Q$ ). Учитывалось, что при эксплуатации результирующий поток взаимоиндукции искажается (по сравнению с режимом холостого хода). В результате в зазоре появляется ряд дополнительных высших гармоник, которые влияют на усилия, приложенные к валу ротора. Угол нагрузки  $Q$  определялся при помощи графических опций расчётного пакета методом итераций. Описан алгоритм реализации



этого метода. При различных значениях эксцентриситета и при разных режимах работы быстроходной машины определены распределение радиальных усилий вдоль периферии вала ротора (дифференциальный параметр) и суммарное усилие радиального тяжения, приложенное к валу ротора (интегральный параметр).

**Ключевые слова:** быстроходная синхронная машина, радиальный эксцентриситет, сила магнитного тяжения, постоянные магниты, пространственные гармоники.

One of the problems of high-speed machines development for various industries (oil and gas production, robotics, space technology, mini gas turbine installation) is the problem of modern bearings design (for example, magnetic, gas and others). Given the wide range of capacities (from tens of kilowatts to megawatts) and rotational speeds (from 6000 to 60000 rpm) of these machines, the development of the design of bearings should involve distributed force calculation (applied to the rotor shaft) in the various operating modes, including the case of eccentric shaft position, which should not exceed 5%. The algorithm is developed to calculate the radial force distribution. The algorithm takes into account saturation of the magnetic circuit of the machine and the spatial harmonic of the mutual flux (flux in the air gap). It is based on a numerical simulation (2D) of magnetic field in the active part of the machine. In no-load operation mode the machine with the permanent magnets features higher magnetic flux than in the rated mode. The difference is caused by the lack of the armature demagnetizing reaction and could be up to 10–15% of rated flux value. The flux increment depends on the type of the permanent magnets and is calculated in the algorithm. To simulate the rated mode it is necessary to know the load angle (static stability angle)  $Q$ . In rated mode, the flux is distorted by the armature reaction. That brings additional higher spatial harmonics to the magnetic flux spectrum and affects the magnetic forces distribution. The angle  $Q$  is calculated using graphical options of the simulation package. The paper describes the practical implementation of the algorithm. The results are calculated for different values of eccentricity and operating conditions of the machine and include the distribution of the radial forces along the rotor shaft surface (differential parameter) and the total radial force applied to the rotor shaft (integral parameter).

**Key words:** high-speed synchronous machine, radial eccentricity, bearing force, permanent magnets, spatial harmonics.

## **Стабилизация напряжения переменного тока**

**КОРШУНОВ А.И.**

Рассмотрены два варианта построения импульсных стабилизаторов напряжения переменного тока (ИСНПТ). В первом из них контролируется действующее, среднее или амплитудное значение напряжения переменного тока. Для его определения необходим интервал наблюдения, равный или кратный половине периода измеряемого напряжения. Во втором варианте контролируются мгновенные значения напряжения переменного тока, что позволяет не только стабилизировать уровень, но также исправлять форму напряжения и компенсировать кратковременные скачки и провалы напряжения. Показано, что построение ИСНПТ по вольтобавочной схеме, снижающей требования к допустимому напряжению транзисторов и конденсатора фильтра, ухудшает качество стабилизации и исправления формы напряжения. Поскольку использование принципа

обратной связи приводит к искажению формы выходного напряжения, рационально строить ИСНПТ по принципу управления по возмущению. Это позволяет повысить быстродействие стабилизатора, поскольку он реагирует непосредственно на причину, вызывающую изменение выходного напряжения, а не на ее следствие. Показано, что сглаживающее действие фильтра зависит от произведения емкости конденсатора на индуктивность дросселя, а выходное сопротивление и колебательность фильтра уменьшаются при увеличении емкости и уменьшении индуктивности. Приведен пример расчета ИСНПТ, контролирующего мгновенные значения выходного напряжения и результаты его исследования в системе Matlab Simulink.

**Ключевые слова:** импульсный стабилизатор напряжения переменного тока, стабилизация напряжения и восстановления его синусоидальной формы.

Two versions of impulsive alternating current voltage stabilizer (IACVS) construction are discussed in the paper. In the first of them average voltage, active voltage, or amplitude of voltage is controlled. Measuring of them demands one or somewhat one half voltage periods. In the second version the flowing alternating voltage significances are controlled. This version allows not only to hold voltage stability, but to reestablish voltage's sinusoidal form and to compensate hard voltage's steps and voltage's downfalls too. It is shown that volt-addition scheme demanding smaller transistor's and capacitor's admissible voltage, reduces quality of stabilization voltage's magnitude and voltage's sinusoidal form. It is set, that feed forward control is more suitable for this stabilizer because feedback control alters voltage's sinusoidal form. Feed forward control raises stabilizer's speed, because stabilizer reacts to voltage's instability cause directly. It is shown, that filter's smoothing action depends on capacitance and inductance production. Filter's oscillance and output impedance decrease with capacitance increases and inductance decreases. Second version impulsive alternating current voltage stabilizer's calculation example is discussed. It is shown investigation it with Matlab and Simulink help results.

**Key words:** impulsive alternating current voltage stabilizer, voltage stabilization and reestablish voltage's sinusoidal form.

## **О применении аппарата нечеткой логики в системах управления электротехнологическими установками**

**РУБЦОВ В.П., ЩЕРБАКОВ А.В., СОЛОВЬЕВА Е.В.**

На примере сравнительного исследования традиционных регуляторов температуры электрических печей сопротивления и фаззирегуляторов анализируются возможности и перспективы применения аппарата нечеткой логики в системах управления электротехнологическими установками. Даются рекомендации по целесообразности применения нечетких систем управления для различных видов электротехнологических установок. Приводится анализ развития систем нечеткого регулирования и особенностей их применения. Рассматриваются основные структуры систем, построенных с использованием принципов нечеткого управления, и приводится их классификация.



Исследования проводятся на имитационных моделях регуляторов температуры электрических печей сопротивления с использованием пакета Matlab Simulink, включающего в себя приложение Fuzzy Logic Toolbox. Показано, что использование фаззирегуляторов для простых детерминированных систем управления – вида регуляторов температуры электрических печей сопротивления, не приводит к сколько-нибудь существенному улучшению точности и качества регулирования, но требует усложнения алгоритма управления и быстродействия системы управления. Делается предположение, что использование фаззирегуляторов для управления более сложными электротехнологическими установками, характеризующимися многофакторными процессами с высокой степенью неопределенности и трудностями определения выходных величин, позволит получить более существенный результат в сравнении с традиционными системами.

**Ключевые слова:** системы управления с нечеткой логикой, фаззирегуляторы, электрические печи сопротивления, регуляторы температуры.

Based on example of comparative study of the traditional temperature controllers for electric furnaces and fuzzy regulators, the opportunities and prospects fuzzylogic control systems application are analyzed. Recommendations of fuzzy control systems using for various kinds of electrotechnological installations are given. The analysis of fuzzy control systems evolution and the features of their application are carried out. The basic structures of systems built using the principles of fuzzy control, and their classification are considered. Studies were carried out on simulations of temperature controllers for electric resistance furnaces with the application of Matlab / Simulink software, including the application of FuzzyLogic Toolbox. It is shown that the use of fuzzy controllers for simple deterministic control systems, as a type of temperature controllers for electric furnaces, does not lead to any significant improvement in the accuracy and quality control, but requires a sophisticated algorithm for control and high-speed control. It is suggested that the use of fuzzycontrollers for more sophisticated electrotechnological installations, characterized by a multifactorial process with a high degree of uncertainty and difficulties in determining the output values will yield more significant results when compared to conventional systems.

**Key words:** control system with fuzzy logic, fuzzy controllers, electric resistance furnaces, temperature regulators.

### **Система управления тепловыми зонами электрических печей сопротивления ГОРЯЧИХ Е.В.**

Приведена функциональная схема регулятора температуры электрических печей сопротивления с компенсацией разности температур в тепловых зонах печи путем автоматической коррекции мощности, поступающей в тепловую зону. Определена дополнительная мощность, необходимая для компенсации разности температур в тепловых зонах печи. Эта мощность зависит от разности температур между тепловыми зонами в процессе нагрева, температурой нагрева и заданной допустимой разностью температур между тепловыми зонами. Определены зависимости относительной

дополнительной мощности от разности температур между тепловыми зонами при температурах нагрева в диапазоне 700–1600 °С и допустимых разностях температур между тепловыми зонами – 5, 15, 30 и 50 °С. Приведены рекомендации по настройке системы управления. Разработана адаптивная система управления тепловыми зонами ЭПС.

**Ключевые слова:** электрическая печь сопротивления, регулятор температуры, тепловая зона, адаптивная система управления.

The description of the functional diagram of the temperature controller EPS with compensation of a temperature difference in the heating zones of the furnace by means of automatic power correction coming in heat zone is provided. The determination of the value of additional power required to compensate for the temperature difference in the heating zones of the furnace is provided. The value of the required additional capacity is determined by the temperature difference between thermal zones in the heating process, the heating temperature and a predetermined allowable temperature difference between the thermal zones. The dependences of the relative value of additional power from the temperature difference between thermal zones at temperatures of heating 700–1600 °С and the allowable temperature difference between thermal zones 5–50 °С is determined. The recommendations configuration of control system is provided. Adaptive control system of thermal zones EPS is developed.

**Key words:** electric resistance furnace, temperature controller, heating zone, adaptive control system.

#### **К оптимизации изоляции коаксиального высоковольтного ввода**

**ИВАНОВ Д.В., ОСТРЕЙКО В.Н., ЯРОШЕНКО Д.С.**

Статья посвящена задаче повышения электрической прочности высоковольтных вводов. В коаксиальном цилиндрическом вводе с радиусами  $r_0$  и  $r$   $r < m$   $> 0$ , определяющими изоляционный промежуток  $(r - r_0)$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_0$ , эта задача решена с помощью дополнительного слоя изоляции. Этот слой с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon > 0$  ограничен радиусами  $r_0$  и  $r$   $r < m$ . Получен простой алгоритм расчёта оптимальной толщины этого слоя, минимизирующий максимальную напряжённость в функции радиусов  $r_0$ ,  $r$  и относительной проницаемости  $\epsilon / \epsilon_0$ . Данный алгоритм преобразован также в алгоритм синтеза толщины указанного слоя, обеспечивающей минимальную напряжённость  $E_m$ . В удобной для практического использования форме даны оптимальные относительные значения всех размеров высоковольтного ввода в функции диэлектрической проницаемости слоя и степени снижения напряжённости  $E_m$ .

**Ключевые слова:** коаксиальный высоковольтный ввод, электрическая напряжённость, изоляция, слой, диэлектрическая проницаемость.

The article is devoted to relevant objective for increasing the electric strength of high voltage bushing by reducing value of maximum intensity. Regarding to coaxial cylindrical bushing with radius  $r_0$  and  $r$   $r < m$   $> 0$  defined insulating space with the value  $r - r_0$  with dielectric capacity

$\epsilon_0$ , the object is solved under additional layer of insulation. Given layer with dielectric capacity  $\epsilon > 0$  limited with radius  $r_0$  and  $r < m$ . Simple calculation algorithm of optimum thickness of this layer minimizing value is received as a function of radius  $r_0$ ,  $m$  and specific conductivity  $\epsilon / 0 > 1,582$ . Hereat according to calculation the reduction of in comparison with can achieve several dozens of percents. Abovementioned algorithm is transformed also to the synthesis algorithm of thickness of specified layer providing indicated value of intensity. Specified algorithms are illustrated in the table with corresponding calculations. Optimum relative values of all high voltage bushing's dimensions as a function of dielectric capacity and level of reduction are given in the Table which is convenient for practical use.

**Key words:** coaxial high voltage bushing, electric intensity, insulation, layer, dielectric capacity.

### **Адаптивное управление в быстродействующих электроприводах подачи станков некруглого точения**

**НИКОЛЬСКИЙ А.А., КОРОЛЕВ В.В.**

Рассмотрены вопросы совершенствования быстродействующих электроприводов подачи станков, применяемых для обработки таких массовых и точных изделий машиностроения, как поршни ДВС, имеющих сложную овально-бочкообразную форму. Показано, что в целях снижения ошибок формы, такие электроприводы должны обладать астатизмом по усилию резания. При обработке поверхности поршня встречаются как зоны непрерывного резания, так и зоны резания, прерывающегося на части оборота шпинделя (например, при прохождении резцом отверстий и т.п.). Показано, что при этом целесообразна структура с интегрально-пропорциональным (ИП) регулятором, а при прерывании резания – с пропорциональным (П) регулятором. Предложен регулятор, структура которого изменяется в функции признака резания. Применение адаптивного регулятора с переменной структурой в системе управления приводами подачи станков некруглого точения по сравнению с линейным ИП-регулятором снижает ошибку формы, вызванную прерывистым резанием, в 5–20 раз. Дополнительный эффект от применения адаптивного управления достигается за счет значительного (в несколько раз) повышения срока использования дорогостоящего алмазного режущего инструмента. Управление структурой регулятора целесообразно как в системах с программным формированием управляющих воздействий, так и системах, использующих принципы самообучения.

**Ключевые слова:** станки некруглого точения, электроприводы подачи, обработка поршней ДВС, прерывистое резание, точность формы поршней, адаптивное управление, регулятор с переменной структурой.

Mass engineering products, as pistons engine with a complex oval barrel shaped, machined at noncircular turning with fast electric drives of filing. It is shown that, in order to reduce errors forms such actuators must have astatism for effort cutting. When surface processing of the piston it is zones as the continuous cutting and as discontinuous cutting, in portion of a revolution the spindle (e.g., the passage apertures, etc.). It is shown that when cutting is suitable structure with proportional-integral (PI) controller, and when interrupted cutting with proportional (P) controller. Proposed controller, the structure of which varies as a function sign

of cutting. Application of the adaptive variable structure reduces the error of form caused by the interrupted cut, 520 times. Additional effect of the use of adaptive management is achieved by significantly (several times) increase the life of the costly diamond cutting tool. Management of structure it is advisable to control systems with programmed formation of control actions, and systems using the principles of selflearning.

**Key words:** drives for noncircular turning lathes, machining piston of engine, precision forms of pistons, interrupted cut, adaptive control, controller with variable structure.

### **Анализ показателей надежности типичного полупроводникового устройства силовой электротехники**

**КУЗНЕЦОВ Г.В., КРАВЧЕНКО Е.В., ПРИБАТУРИН Н.А.**

Предложен новый подход к прогнозированию показателей надежности на основе численного анализа неоднородных температурных полей силовых полупроводниковых приборов (СПП). Анализ теплового режима работы проводился в двумерной постановке на основе типичного для силовой электротехники прибора – силового диодного модуля с температурой перехода  $T_{пер}=125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для решения дифференциального уравнения теплопроводности применялся метод конечных разностей. В ходе численных экспериментов изменялась температура окружающей среды ( $25\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и пространственная ориентация (расположение) диодного модуля. Установлено, что перепады температур составляют более  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для анализа показателей надежности диодного модуля выбраны две математические модели – Аррениуса и мультипликативная (статистическая) модель. Повышение температуры окружающей среды с  $25$  до  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к снижению показателей надежности силового диодного модуля приблизительно в два раза. Вертикальная установка модуля снижает теплоотвод в условиях естественной конвекции и вызывает увеличение интенсивности отказов на  $10\%$  для  $T_{окр}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При расположении диодного модуля теплоотводящей поверхностью вниз показатели надежности снижаются на  $18\%$  при прочих равных условиях. Наибольшие различия в оценках показателя надежности СПП наблюдаются при расположении диодной сборки теплоотводящей поверхностью вниз. Так, при температуре окружающей среды  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  интенсивность отказов по модели Аррениуса была в  $325$  раз выше, чем у мультипликативной модели. Показана необходимость учета реальных нестационарных температурных полей для повышения достоверности прогноза рабочего ресурса СПП.

**Ключевые слова:** силовой полупроводниковый прибор, прогнозирование надежности, тепловое состояние, неоднородные нестационарные температурные поля, интенсивность отказов.

A new approach for predicting the reliability indices based on the numerical analysis of non-uniform temperature fields of power semiconductor devices. Thermal analysis of the power diode module was carried out in two-dimensional formulation with a junction temperature  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . For analysis we used to the finite difference method solving differential equation of heat conduction. In the numerical experiments varied ambient temperature from  $25$  to  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  and dimensional orientation of the diode module. It was found that the temperature difference on

the module is more than 100 °C. To analyze the reliability indices diode module selected two mathematical models Arrhenius and multiplicative (statistical) model. It is found that raising the ambient temperature from 25 to 45 °C reduces approximately two time the reliability indices of the power diode module. Vertical orientation of the module reduces the heat transfer and the failure rate indices growing up to 10% in conditions of natural convection for  $T_{amb} = 25$  °C. With the heat sink configuration the diodes module surface down reliability indices has reduced by 18%, else being equal. The largest differences in estimates of the reliability of the power diode module observed at the location of the diode heat sink assembly surface down. For example, the failure rate for the Arrhenius model was 325 times higher than that of the multiplicative model for ambient environment 45 °C. Shown the necessity analysis of real unsteady temperature fields to increase forecast reliability resource of the power diode module.

**Key words:** power semiconductor devise, predicting of reliability, thermal condition, inhomogeneous non-stationary temperature fields, failure rate.