

**Асинхронизированный синхронный электропривод шахтной подъемной установки  
ПАНКРАТОВ В.В., КОТИН Д.А., ВДОВИН В.В.**

Статья посвящена проблеме построения регулируемого электропривода шахтных подъемных установок на базе асинхронизированной синхронной машины. Рассмотрены проблемы, стоящие перед разработчиками данной системы электропривода, в частности, идентификация неизмеряемых координат электрической машины, предложены пути их решения. Описана функциональная схема частотно\_регулируемого электропривода двойного питания, построенная с использованием многоуровневого преобразователя частоты на базе H-мостов. Рассмотрен алгоритм бездатчикового векторного управления для случая измерения только роторных переменных – токов и напряжений. Предложен способ построения комбинированного алгоритма управления, совмещающий бездатчиковый подход и вариант векторного управления с использованием инкрементного энкодера, который обеспечивает работоспособность механизма подъема как на нулевой частоте вращения электродвигателя, так и на синхронной скорости. Приведены результаты цифрового моделирования многодвигательной системы электропривода с режимом выравнивания загрузки электрических машин.

**Ключевые слова:** шахтная подъемная установка, асинхронизированный синхронный электропривод, бездатчиковое управление, энкодер

The paper is devoted to the problem of controlled electric drive constructing based on doubly fed induction motor for mine hoisting plants. Considered the problems faced by developers of the current electric drive system, in particular identification of unmeasurable coordinates of electric machine and suggested the ways of their solution. Considered the function diagram of frequency-controlled doubly fed electric drive, built using multilevel frequency converter on the H-bridges basis. The algorithm of sensorless vector control for the case of only rotor variables measure – currents and voltages are considered. Introduced a way of constructing of a hybrid control algorithm combining sensorless approach and alternative vector control using an incremental encoder, which provides the efficiency of the hoisting mechanism both at zero speed and synchronous speed of electric motor. Simulated results of multimotor electric drive system with the load balancing of electric machines mode are given.

**Key words:** mine hoisting plant, doubly fed induction motor drive, sensorless control, encoder.

**Двухканальная система стабилизации разрежения в топке котлоагрегата с управляемым асинхронным электроприводом  
МАРЧЕНКО М.А., СИМАКОВ Г.М.**

Рассмотрена двухканальная система стабилизации давления в топке котлоагрегата. Регулирование давления осуществляется с помощью автоматизированного электропривода за счет изменения частот вращения дымососа и дутьевого вентилятора. Предлагается для увеличения стабильности разрежения в переходных режимах управлять работой как дымососов (первый канал регулирования), так и дутьевых вентиляторов (второй канал регулирования). Это снижает время переходных процессов и приводит к более рациональному режиму работы котлоагрегата. Синтезированы регуляторы для первого и второго каналов управления. Синтез осуществлен модифицированным модальным методом. Регулятор первого канала содержит две составляющие: корректор статики и корректор динамики и работает как в установившихся, так и переходных режимах. Регулятор второго канала содержит только корректор динамики и работает лишь в переходных режимах. Такое решение позволяет не вмешиваться в основной процесс горения в топке котлоагрегата в квазиустановившихся режимах и в то же время снижает время переходных процессов, когда процесс горения не является оптимальным. Проведено сравнение систем регулирования, управляемых по одному и двум каналам воздействий.

**Ключевые слова:** автоматизированный электропривод, котлоагрегат, дымосос, дутьевой вентилятор, система регулирования, регулятор, переходные процессы.

The two-channel system of stabilization of pressure in a fire chamber of boiler unit is considered. Regulation of pressure is carried out by means of the automated electric drive due to change of speeds of rotation of the smoke exhauster and the fan. It is offered to control work smoke exhausters (first channel of regulation) and the fans (the second channel of regulation). It increases stability of depression in transitional modes. It reduces time of transients and leads to more rational operating mode of boiler unit also. Regulators for the first and second control paths are synthesized. Synthesis is carried out by the modified modal method. The regulator of the first channel contains two components: the regulator of a statics and the regulator of dynamics, it works at two modes: established and transitional. The regulator of dynamics contains the regulator of the second channel only and it works at transitional modes only. Such decision allows not to interfere with the main process of burning in a fire chamber of boiler unit in having been quasiestablished modes. It also reduces time of transients when process of burning isn't optimum. Comparison of systems of the regulation operated on one and two channels of influences is carried out.

**Key words:** automated electric drive, boiler unit, smoke exhauster, fan, regulation system, regulator, transients.

#### **Синтез двумерной, двухмассовой электромеханической системы моделирующего испытательного стенда**

**БОРОДИН А.М.**

Рассмотрена электромеханическая система стенда для объектов испытаний с упругими свойствами, математическая модель которой в относительных единицах общеизвестна. Использована методика синтеза, позволяющая учесть естественные перекрестные связи в объекте испытания и обеспечивающая в двумерных системах стандартные формы переходных процессов прямых каналов регулирования и инвариантность каналов регулирования. Рассмотрен вариант синтеза с использованием интегральных и пропорциональных регуляторов для каждого канала. Получены полиномы числителей (два для прямых каналов и два для перекрёстных связей), которые подвергаются реконструированию с целью получения требуемых распределений нулей каналов за счёт избыточного вектора состояния объекта и параметров регуляторов. Сформулированы условия совместимости алгебраических уравнений по распределению нулей прямых и перекрёстных каналов.

**Ключевые слова:** испытание, моделирование, анализ, синтез, полиномы.

It is considered the electromechanical system of the bench for objects of tests with elastic properties. The mathematical model of the bench is given at relative units, it is well known. There is synthesis technique, allowing to consider natural cross communications in object of test. The synthesis technique provides in two dimensional electro mechanical system standard forms of transients in direct channels of regulations and invariance of channel of regulations. The article considers synthesis option with use of integral and gain regulators for each channel. Having did out transformations, it is decided four polynoms of numerators (two polynoms is used for direct channels, two polynoms is used for cross communications). The obtained polynoms are exposed to reconstruction for the purpose of obtaining demanded distributions of zero channels at the expense of an excess vector of a condition of object and parameters of regulators. Conditions of compatibility of the algebraic equations on distribution of zero straight lines and cross channels are received.

**Key words:** test bench, synthesis, modeling, system, analysis.

#### **Повышение эффективности функционирования тягового электропривода троллейбуса**

### **АНОСОВ В.Н., КАВЕШНИКОВ В.М., ЯРОСЛАВЦЕВ М.В.**

Рассматривается возможность использования на электрическом транспортном средстве (ЭТС) автономного хода на неэлектрифицированных участках маршрута. Для питания тягового электродвигателя в этом случае на ЭТС должна быть установлена дополнительная аккумуляторная батарея. С целью рационального выбора элементов энергоустановки проведены экспериментальные исследования режимов движения ЭТС в реальных дорожных условиях. Полученный экспериментальный материал систематизирован и обработан, выявлены основные закономерности движения ЭТС. Статистическими методами произведён выбор элементов энергоустановки. Показано, что режимы движения автономных транспортных средств характеризуются неравномерностью потребления энергии от источника питания. Для её устранения предложено применение бортовых накопителей энергии, которые могут сгладить неравномерность потребления мощности. В качестве таких накопителей могут использоваться электрохимические двухслойные конденсаторы. Применение электрохимических конденсаторов в качестве буферного источника энергии при соответствующем управлении позволит улучшить условия эксплуатации аккумуляторной батареи и увеличить дальность пробега автономного транспортного средства.

**Ключевые слова:** тяговый электропривод, накопитель энергии, статистические методы.

Using possibilities of autonomous motion of electrical vehicle (EV) in non-electrified route parts. In the case it is necessary to set supplementary accumulator on the EV to traction motor power supply. Experiments for searching of motion regimes have been done in real road conditions to rational choosing of power unit elements. Received experimental material have been systematized and worked up, revealed base regularities of EV motion. Choosing of power set elements have been done by statistical methods. It is shown, that EV motion regimes have typical irregularity of energy consumption from power supply. For its removal boarding energy accumulators are suggested which can smooth out the irregularities. Electrochemical two-layer capacitors can be used as such accumulators. Application of electrochemical capacitors as a buffer power source when correctly controlled allows improve exploitation conditions of accumulator and increasing EV run.

### **Определение параметров энергоустановки гибридного автомобиля моделированием процесса потребления энергии ЯРОСЛАВЦЕВ М.В.**

При эксплуатации гибридных энергетических установок с промежуточным накоплением энергии в буферном накопителе возможно недопустимое снижение уровня запасенной энергии. При проектировании гибридных энергоустановок необходимо выбирать параметры их элементов, снижающие вероятность таких ситуаций. В статье описан метод выбора параметров энергоустановок, основанный на представлении потребления энергии как случайного процесса, на примере расчета энергетической установки легкового гибридного автомобиля. Показана взаимосвязь минимально необходимого резерва мощности первичного источника энергии и резерва энергоемкости буферного накопителя. Описанный способ может быть применен для расчета мощности генератора и энергоемкости БНЭ реальных гибридных транспортных средств, используя параметры процесса, описывающего мощность тягового привода, в качестве исходных данных. Практическое использование метода требует экспериментального уточнения свойств случайных процессов, описывающих режимы движения и потребления энергии.

**Ключевые слова:** гибридное транспортное средство, тяговый привод, буферный накопитель энергии, случайный процесс, потребление энергии.

During operation of hybrid powertrain with intermediate buffer energy storage an inadmissible lowering of stored energy amount may occur. The parameters of hybrid powertrain elements should be chosen to

minimize the probability of such cases. The article describes a method of powertrain parameters calculation based on representation of energy consumption as random function. The method is described by the example of a passenger car powertrain. The dependence of minimal required power reserve of primary energy source and minimal required buffer energy storage capacity is shown. The described method can be used to calculate the primary energy source power and buffer energy storage capacity of different hybrid vehicles using random function specifying their energy consumption. Application of the method requires further experimental investigation of these random functions parameters.

**Key words:** hybrid vehicle, traction drive, buffer energy storage, random function, energy consumption.

#### **Адаптивные системы тягового электроснабжения СОПОВ В.И., ЩУРОВ Н.И., ИВАНОВ А.В., КУЗНЕЦОВ А.П.**

В настоящее время имеет место большое разнообразие систем тягового электроснабжения – эксплуатируемых, проектируемых и разрабатываемых на перспективу. Это обусловлено специфическими особенностями электрических транспортных систем, развитием науки и техники. Разнообразие систем тягового электроснабжения стало возможным благодаря развитию силовых полупроводниковых приборов для преобразований параметров электроэнергии, а также существенному совершенствованию коммутационного и силового оборудования. В целом, для систем тягового электроснабжения не решены вопросы управления режимами работы и обеспечения заданных параметров качества электроэнергии на токоприёмниках электроподвижного состава (ЭПС). Показатели качества электроэнергии предусмотрены различными нормами, техническими условиями, правилами устройства, эксплуатации, ГОСТ, но при этом не рассматривается оптимизация режимов функционирования транспортной системы. Под оптимизацией режимов можно понимать следующие факторы:

- напряжения на токоприёмниках ЭПС, его отклонения и колебания, влияющие на скорости движения и тяговые характеристики;
- технологические расходы электроэнергии на транспортировку в проводящих сетях, силовых элементах системы;
- использование энергии электрического торможения.

Для выполнения оптимизационных режимов работы необходимы системы тягового электроснабжения адаптивного типа. Это следует понимать как непрерывную эволюцию системы тягового электроснабжения под энергопотребление поездов. В статье приведен анализ системы тягового электроснабжения адаптивного типа с устройствами преобразования напряжений в межподстанционной зоне. Показаны схемы и характеристики элементов системы, дана оценка электрических величин.

**Ключевые слова:** электроподвижной состав, система тягового электроснабжения, тяговая сеть, пункт питания, пост секционирования, эквивалентное сопротивление.

Now is a great variety of the traction power supply system, exploited, design and developed for the future. This is due to the specific characteristics of the electric transport systems, development of science and technology. The diversity of traction power supply systems became possible thanks to the development of power semiconductor devices for reform of the electric power parameters, as well as significant improvements switching and power equipment. In General, for traction power supply systems are not solved the issues of operation control and ensure the given parameters of quality of electric power on pantographs of the electric rolling stock (ERS). The quality of electricity provided by different standards, specifications, rules, device operation, GOST, but it is not considered functioning regimes optimization of the transport system. Under the optimization of modes can be understood by the following factors:

- voltage ERS equipment, its deviations and variations that affect the speed and traction

characteristics;

– technological, power consumption for transportation in conductive networks, the power system elements;

– energy use electric braking.

The traction power supply system of adaptive type required to perform the optimization of operating modes. Adaptation must be understood as a continuous evolution of the traction power supply system under the trains consumption.

The article is an analysis of the traction power supply system of adaptive type with voltage conversion device in interstation zone. Circuits and characteristics of system elements are shown, evaluation of electrical quantities are given.

**Key words:** electric rolling stock, traction power supply system, traction circuit, supply station, sectioning post, equivalent resistance.

### **Секторное регулирование в четырехзонном выпрямителе с лестничной структурой для электровозов на переменном токе**

**МЯТЕЖ С.В., ЩУРОВ Н.И., ДЖАБОРОВ М.М.**

Рассмотрен способ повышения коэффициента мощности вентильных однофазных выпрямителей для электровозов, работающих на переменном токе. Актуальность данной работы связана с необходимостью разработки и совершенствования технических средств для обеспечения энергетической эффективности электротранспортного комплекса и решения важной задачи энергосбережения. На основе предложенного ранее схемного решения четырехзонного вентильного выпрямителя с лестничной структурой, за счет изменения топологии соединения вентилей, а также их алгоритмов управления, достигнуто повышение коэффициента мощности на 4–5%. Проведены работы по дальнейшему совершенствованию рассматриваемого выпрямителя, которые связаны с изменением принципа регулирования уровнем средневыпрямленного напряжения в области наиболее малых значений коэффициента мощности, соответствующих первой зоне. Выполнен расчет долей реактивной мощности и уровней высших гармоник, определяемых коэффициентами сдвига и искажения для секторного способа регулирования. Оценена эффективность применения секторного регулирования как способа повышения коэффициента мощности четырехзонного выпрямителя с лестничной структурой для электровозов на переменном токе.

**Ключевые слова:** электровоз, секторное регулирование, коэффициент мощности, лестничная структура, зонно-фазовый выпрямитель.

Discloses a method for improving power factor single phase rectifier valve for electric locomotives operating on alternating current. The relevance of this work is related to the need to develop and improve the technical means to ensure energy efficiency electrotransport complex and the important task of saving. On the basis of previously proposed circuit design of the four valve rectifier with a ladder structure, due to changes in the topology of the compound gates, as well as their control algorithms achieve improved power factor by 4–5%. Carried out to further improve the consideration of the rectifier, which are associated with changes in the value of the principle of regulation average rectified tension in the most low power factor corresponding to the first zone. The calculation of the proportion of reactive power levels and higher harmonics defined shift and distortion coefficients for sector regulation method. Evaluated the effectiveness of sectoral regulation as a way to improve the power factor of the four rectifier with a ladder structure for electric alternating current.

**Key words:** locomotive, sectoral regulation, power factor, ladder structure, band phase rectifier.

### **Компьютерная поддержка проектирования высоковольтных асинхронных двигателей** **ГРЕЧКИН В.В., ПЕРСОВА М.Г., СОЛОВЕЙЧИК Ю.Г., ТЕМЛЯКОВА З.С.**



Особенностью проектирования тяговых электродвигателей является расчет не только статических, но и динамических режимов. Для решения этой задачи используется, как правило, специализированное программное обеспечение. В статье рассматривается конкретное компьютерное приложение для моделирования режимов асинхронных электродвигателей, используемых в регулируемых электромеханических системах, в частности, в тяговых электроприводах. Компьютерная система включает в себя графический интерфейс, ориентированный на пользователя-электромеханика, и вычислительную часть, реализующую моделирование электродинамических процессов в электрической машине с использованием метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** асинхронные электродвигатели, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

Description of computer system for designing of induction motors which involves the graphic interface for electrician and the computing part for modeling electrodynamic processes in electrical machine with using of the finite element method. The paper describes a computerized system to simulate induction motors operation modes in controllable electromechanical systems such as traction electric drives. The computerized system includes the electrician-oriented graphical interface and the code implementing simulation of electromechanical processes in an electrical machine with the finite elements method.

**Key words:** induction motors, computer simulation (computer modeling), finite element method.

### **Исследование пульсаций момента синхронных магнитоэлектрических машин с дробными зубцовыми обмотками**

**ПРИСТУП А.Г., ТОПОРКОВ Д.М., ШЕВЧЕНКО А.Ф.**

Приведены результаты исследования зубцовых пульсаций момента синхронных машин с постоянными магнитами и дробными зубцовыми обмотками, рассмотрена природа их возникновения. Актуальность исследуемого вопроса обусловлена необходимостью оценки зубцовых пульсаций момента на этапе проектирования машин, разрабатываемых для тех областей применения, где существуют жесткие требования к уровню шумов и вибраций. В качестве объекта исследований с целью упрощения решения выбрана конструкция электрической машины с радиальным расположением магнитов. Получена формула зубцовых моментов, определяемых как результат взаимодействия гармоник магнитного поля и соответствующих гармоник распределения поверхностной плотности тока. Определены условия, при которых возникают зубцовые пульсации момента. Предложены формулы для расчета порядковых номеров гармоник проводимости воздушного зазора и магнитодвижущей силы, участвующих в создании этих пульсаций. Показано, что зубцовые моменты имеют две составляющие. Первая является результатом взаимодействия кратных гармоник поля и проводимости, вторая – взаимодействием гармоник проводимости с комбинационными гармониками поля, обусловленными зубчатостью. Проведено экспериментальное исследование зубцовых пульсаций момента в машине с двенадцатью зубцами и десятью полюсами. Аналитические результаты подтверждены путем гармонического анализа экспериментально полученных зависимостей.

**Ключевые слова:** синхронные машины, постоянный магниты, пульсации момента.

The cogging torque and character of this phenomenon in the permanent magnet synchronous motors with fractional slot concentrated winding is investigated in the paper. The issue timeliness is due to the necessity to estimate cogging torque on the phase of development the machines for applications with severe requirements to noises and vibrations. A machine with surface mounted magnets is selected as the subject of study in order to simplify the task. The formula of the cogging torque determined as the result of interaction between magnetic field harmonics and corresponding harmonics of the surface current density is developed. The formula analysis assigns the condition of the cogging torque

availability. The equations for calculating the number of the airgap permeance harmonics and magneto motive force harmonics contributing the cogging torque generation are presented. The study shows the cogging torque has two components. The first is the result of interacting of the permeance and magnetic field harmonics having the same number, the second component is caused by the interaction between the permeance harmonics and mixed harmonics of the magnetic field induced by the stator slotting. The investigation of cogging torque in the machine having twelve slots and ten poles are presented. Fourier analysis of the experimental data verifies the analytical results.

**Key words:** synchronous motor, permanent magnet, cogging torque.

### **Особенности конструкции и проектирования энергоэффективных магнитоэлектрических электродвигателей общепромышленного назначения**

**ШЕВЧЕНКО А.Ф., ПРИСТУП А.Г., НОВОКРЕЩЕНОВ О.И., ТОПОРКОВ Д.М., КОРНЕЕВ В.В.**

Рассмотрены вопросы создания синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов и дробной зубцовой обмоткой, т.е. обмоткой статора с числом пазов на полюс и фазу меньшим единицы. Такие обмотки обладают рядом уникальных особенностей. Они обеспечивают электрической машине технологические преимущества, например, отсутствие пересечения проводников в лобовых частях существенно упрощает изготовление машины и повышает ее надежность. Кроме технологических и эксплуатационных преимуществ обмотки данного типа позволяют относительно просто реализовывать высокие значения полюсности машины даже при малых диаметрах расточки статора, что в свою очередь, позволяет за счет уменьшения высоты ярма статора получить большие диаметры расточки и увеличить плотность момента на единицу объема. Рассмотрены особенности принятых конструктивных решений, описаны подходы к разработке, особенности методов расчета и моделирования, представлены результаты экспериментальных исследований. Проведено сравнение и показаны преимущества разработанного электродвигателя по сравнению с аналогичными асинхронными двигателями. Полученные результаты показали высокую эффективность данного класса электрических машин.

**Ключевые слова:** синхронные электродвигатели, постоянные магниты, дробные зубцовые обмотки, методы моделирования.

The issues of permanent magnet synchronous motor with fractional slot winding design discussed in the paper. The fractional slot concentrated windings are the windings having number of slots per pole per phase less than unit. This type of windings has following features. A machine with such winding has manufacturing advantages because of there are not any conductors crossing in winding ends, consequently manufacturing process is more simple and reliability is higher. Moreover this kind of windings allows creating of multi-pole machines under respectively small dimensions. In turn it permits increasing of the stator inner diameter and torque density by the way of stator yoke reducing. The features of the construction solutions are considered. The development ways, solutions accepted, calculation and simulation methods are described. The experimental results are presented. The developed motor compared with similar induction motors and advantages of the synchronous machine presented.

**Key words:** synchronous motors, permanent magnets, fractional slot windings, simulation methods.

### **Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий**

**НЕЙМАН Л.А., НЕЙМАН В.Ю.**

Рассмотрена тенденция развития и применения вариантов схем линейных электромагнитных машин ударного действия, в которых возвратно-поступательное движение бойка синхронизировано по времени с частотой подаваемых на катушку или систему катушек импульсов

напряжения от источника питания промышленной частоты. На основании выявленных различий в способах организации режима вынужденных механических колебаний бойка анализируются достоинства и недостатки рабочих циклов синхронных машин, построенных преимущественно по одно- и двухкатушечным вариантам схем. Представлены новые разработки синхронных электромагнитных машин и способы управления ими в рабочем цикле, обеспечивающие необходимую последовательность чередования полуволн напряжений, поступающих на катушки, которые позволяют уменьшить амплитуду тока и влияние работы ударного электропривода на питающую сеть. Для повышения точности в настройке и устойчивости режима вынужденных колебаний предложены новые технические решения, улучшающие характеристики машин и условия их эксплуатации.

**Ключевые слова:** синхронная электромагнитная машина, рабочий цикл машины, частота и энергия удара, способ управления, источник напряжения промышленной частоты.

Linear synchronous electromagnetic impact machine designs as a part of progress trend are considered where the head reciprocal motion is synchronized with 50 Hz power source pulses frequency applied to a coil or a system of coils. On the base of identified differences of the head forced mechanical oscillation processes merits and demerits of the work cycles of single or two coil synchronous machine design variants are analyzed. Synchronous electromagnetic machines of a new design and principles of their control in a work cycle are presented. The specific half-wave interleaving of voltages applied to the coils allows to reduce current amplitude and the influence of the impact drive on the power grid. To improve forced oscillation mode stability and precision the new engineering solutions improving machines performance and exploitation conditions are proposed.

**Key words:** synchronous electromagnetic machine, machine operating cycle, impact frequency and energy, control principle, industrial network.

### **Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы**

**НЕЙМАН Л.А., НЕЙМАН В.Ю., ШАБАНОВ А.С.**

Рассматривается повторно-кратковременный режим работы циклического ударного электромагнитного привода, при котором подводимая от источника питания мощность может существенно превышать значения этой мощности в продолжительном режиме. Актуальность проводимых исследований вызвана необходимостью совершенствования методик инженерного расчета электромагнитного ударного привода, который характеризуется продолжительностью включения в десятиминутном рабочем цикле и различными условиями охлаждения в периоды работы и бестоковой паузы. Расчеты выполнены на основе решения уравнения Ньютона для максимального перегрева любого  $n$ -го цикла при допущении, что электропривод является однородным телом с равномерно распределенным источником тепла, с идеальной теплопроводностью и постоянной мощностью тепловыделения. Для заданной продолжительности включения получены приближенные выражения допустимой из условия нагрева энергии и частоты удара в зависимости от теплофизических и геометрических параметров электропривода, учитывающие различные условия его охлаждения в периоды работы и паузы. Приведен пример упрощенного расчета полезной ударной мощности электромагнитного ударного привода для различных условий охлаждения и продолжительности включения.

**Ключевые слова:** электромагнитный ударный привод, повторно-кратковременный режим работы, допустимый нагрев, условия охлаждения, энергия и частота удара, полезная ударная мощность.

The periodic reciprocated operation mode of the impact electromagnetic drive is considered when power from the power source can be extremely more than long-term mode power. The purpose of the



research made is to improve electromagnetic impact drive design methods. The drive operation is described by relative 'ON' state duration (% of 10 min operation cycle) and various cooling conditions in 'ON' and 'OFF' state. 'OFF' state means no current. The calculations are based on Newton equation solution for maximal overheat in any n-th cycle if the electric drive is assumed to be a homogeneous body with the uniformly distributed heat source, ideal thermal conductivity and constant heat dissipation power. For given 'ON' duration approximate expressions are obtained for permitted energy with respect to the heating condition and for impact frequency depending on electric drive thermal and geometric parameters with respect to various cooling conditions and 'ON' state duration. The example is stated for simplified calculation of effective impact power of electromagnetic impact drive for various cooling conditions and 'ON' duration.

**Key word:** electromagnetic impact drive, intermittent mode, permissible heating, cooling conditions, impact frequency and energy, useful impact power.

### **Симметрирование электрических параметров расшихтованного жесткого токоподвода руднотермической электропечи**

**АЛИФЕРОВ А.И., БИКЕЕВ Р.А., ГОРЕВА Л.П., ИГНАТЕНКО А.Ю., БОРДУНОВА А.В.**

Статья посвящена решению электротехнической задачи в приложении к основному агрегату ферросплавного производства – руднотермической печи (РТП). Вторичный токоподвод такой установки должен иметь минимальные активное и индуктивное сопротивления и симметрию токоподводов фаз. Рабочие токи в электродах РТП могут превышать 100 кА. Для канализации таких токов фазы расщепляют на параллельные проводники. Жесткий неподвижный токоподвод от трансформатора к гибкой части выполняют в виде пакета прямоугольных шин или трубошин. Наиболее часто используемая схема токоподвода предполагает, что до электродов протекают линейные токи, а значит, перешихтовкой проводников полуфаз может быть достигнуто уменьшение индуктивного сопротивления шинопакета. На этапе проектирования возникает многовариантность конструкции шихтованного пакета. Для принятия решения удобно иметь простую методику оценки активного и индуктивного сопротивлений шинопакетов. Одностороннее расположение источника питания относительно ванны печи обуславливает существенную разницу длин шинопакетов фаз, что является причиной асимметрии вторичного токоподвода в целом. Эта несимметрия приводит к неравномерности выделения мощности в рабочем пространстве РТП, а следовательно, к снижению технико-экономических показателей работы печи. Методом численного моделирования проведены исследования зависимостей активного и индуктивного сопротивлений шинопакетов от их геометрических параметров при различных способах перешихтовки. Получены простые формулы, позволяющие рассчитывать электрические параметры шинопакетов и определять конструктивные решения, обеспечивающие симметрию токоподвода.

**Ключевые слова:** руднотермическая печь, расшихтованный токоподвод, численное моделирование электромагнитного поля, активное и индуктивное сопротивления, способы перешихтовки.

The paper states the solution of the electrical engineering problem concerning an ore-thermal furnace (OTF) as the main ferroalloy industrial unit. The secondary current jaw of such unit should have minimal pure resistance and reactance and balanced phase current jaws. Operating currents in OTF electrodes can exceed 100 kA. These currents are distributed between parallel wires. The rigid stationary current jaw from the transformer to the flexible current jaw is implemented as a package of rectangular or tubular bus bars. According to the most frequently used current jaw scheme electrodes carry linear currents. Hence bus package inductance can be reduced by interleaving the half-phase wires. There are many variants of the interleaved package construction design. To select one of the variants it is

convenient to have a simple method how to estimate bus packages pure resistance and reactance values. The power source one-side position relative to the furnace pool causes noticeable bus packages lengths difference leading to the total secondary current jaw unbalance. This unbalance involves non-uniform power dissipation in the OTF operating space and, in turn, OTF performance characteristics decrease. Bus packages pure resistance and inductance values have been studied depending on their geometrical parameters for different restacking ways. Therefore, the equations to calculate easily bus packages electrical parameters and to find engineering solutions providing the balanced current jaw.

**Key words:** ore-thermal furnace, interleaved current jaw, numerical simulation of electromagnetic field, active and inductive resistance, interleaving way.

#### **Аналитический расчет индуцированного электромагнитного поля в слябе прямоугольного поперечного сечения на базе решетчатых схем замещения**

**ИНКИН А.И., АЛИФЕРОВ А.И., БЛАНК А.В.**

Рассмотрены типовые ячейки-многополюсники как базовые элементы синтеза решетчатых схем замещения установок индукционного нагрева с продольным магнитным полем. Двумерное электромагнитное поле индукционной установки разбивается на элементарные прямоугольные ячейки, и каждой ячейке поля ставится в соответствие многополюсник, представляющий собой пять электрических ветвей, соединенных в узел. Сопротивления ветвей многополюсника определяются на основе интегральной связи между магнитным потоком и векторным магнитным потенциалом. Аналогом токов в ячейке являются составляющие магнитного потока, аналогом напряжений – магнитные напряжения на границах ячейки. Для расчета решетчатой схемы замещения могут быть использованы методы теории цепей, а также программы для схемотехнического моделирования.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, плоскопараллельное электромагнитное поле, каскадные схемы замещения, решетчатые схемы замещения.

The paper considers developing typical multi-port cells as basic elements to synthesize grid equivalent circuits of induction heating with longitudinal magnetic field. Induction unit two-dimensioned electromagnetic field is divided into elementary rectangular cells. Each cell corresponds to the multi-port consisting of the five branches connected to the same node. Multi-port branches resistances are determined from integral dependence between magnetic flux and vector magnetic potential. Magnetic flux is similar to current in a cell and magnetic voltage at cell borders is similar to electrical voltage. The grid equivalent circuit can be calculated with the circuit theory methods and circuit simulation software.

**Key word:** induction heating, 2D in-plane electromagnetic fields, cascade equivalent circuits, grid equivalent circuits.