

## **Симметрирование шинопакетов вторичных токоподводов руднотермических печей**

АЛИФЕРОВ А.И., БИКЕЕВ Р.А., ГОРЕВА Л.П., ГВОЗДКОВ И.Г.

Проектирование коротких сетей руднотермических печей должно обеспечивать минимум активного и индуктивного сопротивлений и их симметрию по фазам. Взаимное расположение источника питания и рабочего пространства таких печей обуславливает разные длины жесткого неподвижного участка короткой сети, что приводит к асимметрии короткой сети в целом, неравномерности выделения мощности по объему рабочего пространства, а значит, неравномерности износа футеровки и снижению производительности. При больших токах фазы расщепляют на параллельные проводники и по возможности перешихтовывают полуфазы для уменьшения их индуктивного сопротивления. Рассматриваемый участок короткой сети выполняют из прямоугольных шин или трубошин. Предложены новые варианты транспозиции и перешихтовок шинопакетов круглых руднотермических печей с целью выравнивания индуктивности фаз без существенного изменения габаритов шинопакетов. Оценка новых вариантов проведена путем численного моделирования электромагнитных процессов, протекающих в элементах короткой сети, в двумерной постановке с помощью пакета ANSYS.

Приведены конкретные примеры симметрирования шинопакетов действующих печей.

**Ключевые слова:** руднотермическая печь, короткая сеть, индуктивное сопротивление, активное сопротивление.

The design of short networks of ore-thermal furnaces should ensure a minimum of active and inductive resistances and their phase symmetry. The relative location of the power source and the working space of such furnaces causes different lengths of the rigid fixed section of the short network, which leads to asymmetry of the short network as a whole, uneven power allocation in terms of the working space, and, therefore, uneven wear of the lining and reduced productivity. At high currents, the phases are split into parallel conductors and, if possible, the semi-phases are re-mixed to reduce their inductive resistance. The considered section of the short network is made of rectangular tires or pipe tires. New variants of transposition and re-loading of busbar packages of round ore-thermal furnaces are proposed in order to equalize the phase inductance without significantly changing the dimensions of the busbar packages. The evaluation of the new variants was carried out by numerical simulation of electromagnetic processes occurring in the elements of a short network in a two-dimensional formulation using the ANSYS package.

Specific examples of busbar package symmetry in operating furnaces are given.

**Key words:** ore-thermal furnace, short network, inductive resistance, active resistance.

*Электротехника, 2021, №6, стр. 8-12*

**Исследование режима перемешивания расплава алюминия в индукционной системе с постоянными магнитами**

МОРЕВ А.Э., АЛИФЕРОВ А.И., КУЗНЕЦОВ В.А.

Для эффективного перемешивания алюминиевого расплава чаще всего используются установки, генерирующие низкочастотное бегущее электромагнитное поле, создаваемое многофазной обмоткой, расположенной вблизи жидкого металла. Применение перемещаемых постоянных магнитов обеспечивает малые габариты установки, низкую стоимость источника питания, возможность гибкого управления частотой поля в широком диапазоне и электрический КПД до 80%. С помощью системы вращающихся постоянных магнитов можно организовывать в объеме металлического расплава крупномасштабные и мелкомасштабные потоки различных конфигураций. Правильный выбор режима движения расплава позволяет обеспечить растворение внесенных добавок, дегазацию расплава, сепарацию частиц окислов и шлаков, выровнять по объему расплава его состав и температуру. В статье представлены результаты численного моделирования магнитогидродинамических процессов в цилиндрической ванне расплава, охваченной вращающейся системой постоянных магнитов. Представлены зависимости активной мощности, выделяющейся в расплаве, от скорости вращения и числа пар полюсов магнитной системы, радиального распределения электромагнитной силы и поля скоростей в расплаве.

**Ключевые слова:** перемешивание расплава алюминия, индукционный нагрев, вращающееся магнитное поле, постоянные магниты, математическое моделирование.

For efficient mixing of aluminum melt, installations that generate a low-frequency traveling electromagnetic field generated by a multiphase winding located near the liquid metal are most often used. The use of movable permanent magnets provides a small installation size, low cost of the power supply, the possibility of flexible control of the field frequency in a wide range and an electrical efficiency of up to 80%. With the help of a system of rotating permanent magnets, large-scale and small-scale flows of various configurations can be organized in the volume of the

metal melt. The correct choice of the melt movement mode allows to ensure the dissolution of the added additives, degassing of the melt, separation of oxides and slags, and to equalize its composition and temperature in terms of the melt volume. The article presents the results of numerical simulation of magnetohydrodynamic processes in a cylindrical melt bath covered by a rotating system of permanent magnets. The dependences of the active power released in the melt on the speed of rotation and the number of pairs of poles of the magnetic system, the radial distribution of the electromagnetic force and the velocity field in the melt are presented.

**Key words:** mixing of aluminum melt, induction heating, rotating magnetic field, permanent magnets, mathematical modeling.

*Электротехника, 2021, №6, стр. 12-18*

### **Расчет виброактивности элементов конструкции синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка**

НЕЙМАН Л.А., НЕЙМАН В.Ю.

Рассмотрены вибрационные процессы в конструкции усовершенствованной синхронной электромагнитной машины. В результате совместного решения уравнений электромагнитного состояния и поступательного движения элементов конструкции многомассовой механической системы получена математическая модель динамического состояния машины в виде системы дифференциальных уравнений. Основные расчеты выполнены в MATLAB Simulink методами структурного моделирования. По результатам моделирования получены временные диаграммы продольных колебаний инерционных масс, учитывающие влияние ударной нагрузки. Показана принципиальная возможность дальнейшего использования модели для оптимизационных расчетов с целью улучшения характеристик синхронных электромагнитных машин, а также для задач проектирования.

**Ключевые слова:** синхронная электромагнитная машина, ударная нагрузка, инерционные массы, виброактивность, математическая модель, динамический расчет, методы структурного моделирования.

Vibration processes in the design of an improved synchronous electromagnetic machine are considered. As a result of the joint solution of the equations of the electromagnetic state and the translational motion of the structural elements of a multi-mass mechanical system, a mathematical model of the dynamic state of the machine in the form of a system of differential

equations is obtained. The main calculations were performed in MATLAB Simulink using structural modeling methods. Based on the simulation results, the time diagrams of the longitudinal oscillations of the inertial masses are obtained, taking into account the impact of the shock load. The principal possibility of further use of the model for optimization calculations in order to improve the characteristics of synchronous electromagnetic machines, as well as for design tasks, is shown.

**Key words:** synchronous electromagnetic machine, impact load, inertial masses, vibration activity, mathematical model, dynamical calculations, structured modeling methods.

*Электротехника, 2021, №6, стр. 19-25*

### **Аналитический расчет и схемная аппроксимация поля возбуждения явнополюсной электрической машины**

БЛАНК А.В.

Рассматривается аналитическое решение двумерного дифференциального уравнения в частных производных для поля возбуждения явнополюсной электрической машины и синтез на основе этого решения каскадной  $A-H$ -схемы замещения. Особенностью полученного решения является наличие одной кусочно-непрерывной собственной функции задачи Штурма-Лиувилля в области чередующихся полюсов и пространств между полюсами и множества гладких функций в области рабочего зазора. Представлен расчет поля возбуждения тремя различными методами: аналитически, по каскадной  $A-H$ -схеме замещения и численно.

**Ключевые слова:** электрические машины, синхронные электрические машины с обмоткой возбуждения на роторе, поле возбуждения; кусочно-непрерывные собственные функции задачи Штурма-Лиувилля, каскадные схемы замещения.

In the paper, the analytical solution for the exciting field in the salient-pole electric machine is considered and the cascade equivalent  $A-H$ -circuit is synthesized on the base of this solution. In the solution, there are the single piecewise continuous Sturm-Liouville eigenfunction (in the piecewise zone named “poles and air spaces”) and many sinusoidal functions (in the zone of the air gap). The exciting field’s calculation is offered in three different variants: analytically, numerically and on the base of the cascade equivalent  $A-H$ -circuit.

**Key words:** electric machines, synchronous electric machines with the rotor’s exciting coil, exciting field, piecewise continuous Sturm-Liouville eigenfunctions, cascade equivalent circuits.

*Электротехника, 2021, №6, стр. 25-31*

**Алгоритм синхронизации для безударного переключения асинхронного двигателя между преобразователем частоты и питающей сетью**

ДОМАХИН Е.А, КОТИН Д.А.

Рассматривается асинхронный электропривод на базе преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения, который может применяться, как в составе станции частотного управления группой технологических агрегатов, так и в качестве одиночного электропривода. Предложен подход, позволяющий реализовать функцию безударного переключения асинхронного двигателя между преобразователем частоты и питающей сетью. Выполнен анализ процессов, связанных с потерей напряжения питания асинхронной машины. Представлен краткий анализ применяемых в промышленности способов переключения двигательной нагрузки между питающей сетью и преобразователем частоты, кратко рассмотрены границы их применения. Предложен алгоритм автоматического безударного переключения асинхронного двигателя между питающей сетью и преобразователем частоты. Рассмотрены силовая схема такого электропривода, а также структурная схема системы управления, позволяющие реализовать предложенные алгоритмические подходы. Представлена методика расчета регуляторов модуля и фазы выходного напряжения преобразователя частоты. Выполнено имитационное моделирование алгоритмов управления, подтверждающее их работоспособность и реализуемость.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, частотное управление асинхронным электроприводом, безударное переключение, синхронизация напряжений.

An asynchronous electric drive based on a frequency converter with an automatic voltage inverter is considered, which can be used both as part of a frequency control station for a group of technological units, and as a single electric drive. An approach is proposed to implement the function of shockless switching of an induction motor between the frequency converter and the supply network. The analysis of the processes associated with the loss of the power supply voltage of the induction machine is performed. A brief analysis of the methods used in the industry for switching the motor load between the supply network and the frequency converter is presented, and the limits of their application are briefly considered. An algorithm for automatic

shockless switching of an asynchronous motor between the supply network and the frequency converter is proposed. The power scheme of such an electric drive is considered, as well as the block diagram of the control system, which allows implementing the proposed algorithmic approaches. The method of calculation of the module regulators and the phase of the output voltage of the frequency converter is presented. Simulation modeling of control algorithms is performed, confirming their operability and feasibility.

**Key words:** induction motor drive, induction motor variable frequency drive, soft switching, supply voltages synchronization.

*Электротехника, 2021, №6, стр. 31-36*

### **Способы улучшения гармонического состава магнитного поля в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками**

БАБИЦКИЙ Д.Ю., ТОПОРКОВ Д.М., ПРИСТУП А.Г., ТЕМЛЯКОВА З.С.

Особенностью дробных зубцовых обмоток является гармонический состав магнитного поля, в котором присутствует ряд нерабочих гармоник, вызывающих негативные эффекты. В статье рассмотрены существующие способы улучшения гармонического состава магнитного поля в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками. Приведено описание конструкций с реализацией рассмотренных способов. Их эффективность рассмотрена на основе единой модели электрической машины с обмоткой, имеющей число пазов на полюс и фазу  $q=2/5$ . Проведено сравнение рассмотренных способов улучшения гармонического состава магнитного поля дробных зубцовых обмоток между собой, а также с классической дробной зубцовой обмоткой.

**Ключевые слова:** электрическая машина с постоянными магнитами, дробная зубцовая обмотка, гармоники МДС, конечно-элементный анализ.

A specificity of fractional slot winding is magnetic field space harmonic content which consists of number of non-working harmonics that cause undesirable effects. Current work presents existing ways for improve improving magnetic field space harmonic content created in electrical machines with fractional slot winding. Description of design with the application of the considered methods is presented. The efficiency of these methods is considered on the basis of a unified model of an electric machine with  $q=2/5$  number of slots per pole and phase. A comparison of the considered methods for improving of magnetic field space harmonic content

of fractional slot winding is carried out both with each other and with the conventional fractional slot winding.

**Key words:** permanent magnet electrical machine, fractional slot winding, MMF harmonics, finite element analysis.

*Электротехника, 2021, №6, стр. 37-43*

**К методу построения совмещенных обмоток с одним комплектом выводов, создающих согласно и встречно вращающиеся гармоники МДС различной полюсности**

КУЛИКОВ В.П., ЧЕСТЮНИНА Т.В.

Предложен принцип построения совмещенной обмотки переменного тока с одним комплектом выводов, магнитодвижущая сила которой имеет полюсность  $p_1$  и  $p_2$ .

Получены выражения для магнитодвижущей силы и витков фазы совмещенной обмотки, создающих согласно и встречно вращающиеся гармоники магнитодвижущей силы полюсности  $p_1$  и  $p_2$ . Подробно рассмотрены случаи построения совмещенной обмотки с согласно вращающимися гармониками магнитодвижущей силы разной полюсности, даны основные соотношения для распределения проводников в пазах. Приведены пространственные картины согласно вращающихся гармоник магнитодвижущей силы полюсности  $p_1 = 5$  и  $p_2 = 3$ . Предложен конкретный вариант совмещенной двухфазной обмотки.

**Ключевые слова:** совмещенные обмотки, согласно и встречно вращающиеся гармоники магнитодвижущей силы, распределение проводников.

This paper deals with the method of designing an alternating current combined winding with one set of terminals which creates the magneto motive force with numbers of pole pairs  $p_1$  and  $p_2$ . Equations are obtained for the magneto motive and the combined winding phase turns which create co-rotating and counter-rotating magneto motive harmonics with numbers of pole pairs  $p_1$  and  $p_2$ . Cases of designing combined winding with co-rotating magneto motive harmonics with different numbers of pole pairs are described in detail, the main ratios for conductor distribution over slots are given. Spatial pictures of co-rotating magneto motive harmonics with numbers of pole pairs  $p_1 = 5$  and  $p_2 = 3$  with different angular frequencies are provided. A separate variant

of the combined two-phase winding is proposed.

**Key words:** combined winding, co-rotating and counter-rotating MMF harmonics, conductor distribution.

*Электротехника, 2021, №6, стр. 43-49*

**Развитие теории определения неактивных мощностей в несинусоидальной сети однофазного переменного тока**

МЯТЕЖ С.В., ЩУРОВ Н.И., ШТАНГ А.А., У СЯОГАН

Продолжая работы Fryze S. и Budeanu C.I., исследователи столкнулись с ошибками и противоречиями в определении неактивных мощностей. Они были вызваны формальным переносом некоторых положений символического метода на электрические цепи с несинусоидальными напряжениями и токами. В статье показано, что для исследования режимов работы несинусоидальных сетей однофазного переменного тока необходимо представлять напряжения и токи на комплексной плоскости в виде обобщенных векторов, для которых следует определять парные проекции на ортогональные оси.

**Ключевые слова:** реактивная мощность, мощность искажений, гармоники, треугольник мощностей, обобщенный вектор.

Continuing the work of Fryze S. and Budeanu C.I.F, the researchers encountered errors and contradictions in the definition of inactive powers. They were caused by the formal transfer of some provisions of the symbolic method to electrical circuits with non-sinusoidal voltages and currents. The article shows that to study the modes of operation of non-sinusoidal single-phase AC networks, it is necessary to represent voltages and currents on a complex plane in the form of generalized vectors, for which pair projections on orthogonal axes should be determined.

**Key words:** reactive power, distortion power, harmonics, power triangle, generalized vector.

*Электротехника, 2021, №6, стр. 50-55*

**Энергоэффективный гибридный силовой фильтр с оптимальными параметрами**

ЩУРОВ Н.И., ШТАНГ А.А., МАЛОЗЁМОВ Б.В., У СЯОГАН

В статье рассматривается актуальность решаемой проблемы и приводятся ключевые



этапы решения задачи по определению мощности активной и пассивной частей гибридного силового фильтра, предназначенного для компенсации неактивных мощностей в несинусоидальной системе с нелинейными высокочастотными искажениями. Разработана аналитическая методика оптимизации гибридного силового фильтра применительно к системе электроснабжения подстанции Новосибирского метрополитена. Приведены основные результаты экспериментальных исследований и преимущества применения гибридного силового фильтра с оптимальными параметрами по сравнению с выполненными по принципам либо полностью активного, либо полностью пассивного фильтров.

**Ключевые слова:** ресурсосбережение, энергоэффективность, качество электроэнергии . блок конденсаторов, гармоники тока, реактивная мощность, гибридный силовой фильтр, активный силовой фильтр.

The article discusses the relevance of the problem being solved and presents the key stages of solving the problem of determining the power of the active and passive parts of a hybrid power filter (HSP) designed to compensate for inactive powers in a non-sinusoidal system with nonlinear high-frequency distortions. As a result of the research, an analytical technique for optimizing a hybrid power filter has been developed as applied to the power supply system of the Novosibirsk metro substation. The main results of experimental studies are revealed and the advantages of using a hybrid power filter with optimal parameters, compared with those made according to the principles of either fully active or completely passive filters, are presented.

**Key words:** resource saving, energy efficiency, power quality, capacitor bank, current harmonics, reactive power, hybrid power filter, active power filter.

*Электротехника, 2021, №6, стр. 56-60*

**Повышение количества рабочих зон в трехфазном выпрямителе переменного тока**  
МЯТЕЖ С.В., ЩУРОВ Н.И., МАЛОЗЁМОВ Б.В.

Показано, что сочетание фазных и межфазных напряжений трехлучевой звезды позволяет в несколько раз увеличить эквивалентное количество рабочих зон трехфазного выпрямителя без усложнения его схемного решения. С помощью метода структурного синтеза получена простая схема трехфазного выпрямителя с зонно-фазовым регулированием, у которого количество доступных комбинаций выходных напряжений для получения выпрямленного напряжения больше исходного количества зон. При

регулировании выпрямленного напряжения с использованием межфазных напряжений коэффициент мощности выпрямителя равен 0,92–0,956, что сопоставимо с коэффициентом мощности трехфазного неуправляемого мостового выпрямителя. Предложенный принцип построения зонно-фазовых выпрямителей позволяет получить любое количество зон, причем с ростом их числа переход режима работы выпрямителя из одной зоны в другую становится более плавным.

**Ключевые слова:** трехфазный выпрямитель переменного тока, рабочие зоны, зонно-фазовое регулирование, качество электроэнергии, коэффициент мощности выпрямителя.

It is shown that the combination of phase and interphase voltages of a three-beam star allows to increase the equivalent number of working zones of a three-phase rectifier several times without complicating its circuit design. Using the structural synthesis method, a simple scheme of a three-phase rectifier with zone-phase control is obtained, in which the number of available combinations of output voltages to obtain the rectified voltage is greater than the initial number of zones. When regulating the rectified voltage using interfacial voltages, the power factor of the rectifier is 0.92–0.956, which is comparable to the power factor of a three-phase unmanaged bridge rectifier. The proposed principle of constructing zone-phase rectifiers allows you to get any number of zones, and with an increase in their number, the transition of the rectifier operating mode from one zone to another becomes smoother.

**Key words:** three-phase AC rectifier, working zones, zone-phase regulation, power quality, power factor of the rectifier.

*Электротехника, 2021, №6, стр. 61-62*

**Авторы номера**