

## **Содержание**

*Электротехника, 2024, №5, стр. 2-7*

### **Эффективность конструктивных решений токоподвода при модернизации руднотермической печи**

АЛИФЕРОВ А.И., ГОРЕВА Л.П.

Рассмотрен опыт проектирования вторичного токоподвода рудовосстановительной печи с круглой ванной, предназначенной для замены печи с прямоугольной ванной. При этом источник питания далеко не выработал свой ресурс работы, и замена его не предполагалась. Традиционные конструктивные решения короткой сети круглой рудовосстановительной печи, обеспечивающие удовлетворительный уровень ее электрических параметров, предполагают применение схемы вторичного токоподвода «треугольник на электродах». Демонтированная печь имела схему вторичного токоподвода «звезда на трансформаторе». Были разработаны новые конструктивные решения, базирующиеся на общих физических закономерностях формирования электромагнитного поля системы проводников с токами. Их применение обеспечило достаточно высокий уровень вводимой активной мощности, что позволило также уменьшить асимметрию индуктивного сопротивления вторичного токоподвода с 58 до 10 % по сравнению со старой печью. При исследовании использовался метод численно моделирования в специализированном программном обеспечении ANSYS с интеграцией в него геометрической модели из системы автоматизированного проектирования.

**Ключевые слова:** руднотермическая печь, вторичный токоподвод, активное и индуктивное сопротивления, полезная мощность.

The experience of designing a secondary current supply for an ore recovery furnace with a round tub designed to replace a furnace with a rectangular tub is considered. At the same time, the power supply has far from exhausted its working life, and its replacement was not expected. Traditional design solutions of a short network of a round ore recovery furnace, providing a satisfactory level of its electrical parameters, involve the use of a secondary current supply circuit «triangle on electrodes». The dismantled furnace had a secondary current supply circuit

«star on transformer». New design solutions have been developed based on the general physical laws of the formation of the electromagnetic field of a system of conductors with currents. Their use provided a sufficiently high level of input active power, which also made it possible to reduce the asymmetry of the inductive resistance of the secondary current supply from 58 to 10% compared with the old furnace. The study used the method of numerical modeling in specialized software ANSYS with the integration of a geometric model from a computer-aided design system.

**Key words:** ore-thermal furnace, secondary current supply, active and inductive resistances, useful power.

*Электротехника, 2024, №5, стр. 8-13*

**Особенности переноса мощности между фазами дуговой сталеплавильной печи**  
БИКЕЕВ Р.А.

Представлены результаты моделирования электрических режимов работы электропечи ДСП-100И7 с различным конструктивным исполнением вторичного токоподвода – триангулированным и копланарным вариантами с токоведущими рукавами. Получены зависимости коэффициентов асимметрии мощности дуговых разрядов в этих печах при симметричном и несимметричном токовых режимах. Показано существенное влияние несимметричного режима на коэффициент асимметрии мощности дуг в этих печах.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, перенос мощности по фазам, коэффициент асимметрии мощности дуговых разрядов.

The results of modeling the electrical modes of operation of the DSP-100I7 electric furnace with various designs of the secondary current supply – triangulated and coplanar variants with current-carrying sleeves. The dependences of the power asymmetry coefficients of arc discharges in these furnaces under symmetric and asymmetric current modes are obtained. The significant effect of the asymmetric mode on the power asymmetry coefficient of the arcs in these furnaces is shown.

**Key words:** arc steelmaking furnace, phase transfer of power, power asymmetry coefficient of arc discharges.

## **Высокоскоростной многоступенчатый электромагнитный ускоритель**

НЕЙМАН В.Ю.

Рассмотрена классическая схема многоступенчатого электромагнитного ускорителя для метания массивных ферромагнитных тел силами однонаправленного бегущего магнитного поля. Изложен подход к разработке имитационной динамической модели ускорителя. Основу модели составляют дифференциальные уравнения, отражающие динамическое состояние электромеханической системы ускорителя, решение для которых получено методами структурного моделирования в MATLAB Simulink. Предложен способ управления, обеспечивающий увеличение конечной скорости метаемого ферромагнитного тела. Установлено влияние числа последовательно установленных ступеней электромагнитного ускорителя на конечную скорость метаемого тела и дана их количественная оценка. На примере шестиступенчатой конструкции электромагнитного ускорителя получены временные диаграммы, отражающие динамические характеристики варианта имитационной модели.

**Ключевые слова:** многоступенчатый электромагнитный ускоритель, метаемое ферромагнитное тело, динамическая модель, магнитное поле, структурное моделирование.

The classical scheme of a multistage electromagnetic accelerator for throwing massive ferromagnetic bodies by forces of a unidirectional traveling magnetic field is considered. An approach to the development of a simulation dynamic accelerator model is described. The model is based on differential equations reflecting the dynamic state of the electromechanical accelerator system, the solution for which is obtained by structural modeling methods in MATLAB Simulink. A control method is proposed that provides an increase in the final velocity of the thrown ferromagnetic body. The influence of the number of sequentially installed stages of the electromagnetic accelerator on the final velocity of the thrown body is established and their quantitative assessment is given. Using the example of a six-stage electromagnetic accelerator design, time diagrams reflecting the dynamic characteristics of a variant of the simulation model are obtained.

**Key words:** multistage electromagnetic accelerator, a thrown ferro-magnetic body, dynamic model, magnetic field, structural modeling.

### **Динамическая модель импульсного электропривода с управлением по положению бойка**

НЕЙМАН Л.А., НЕЙМАН В.Ю.

Предложена имитационная динамическая модель импульсного электромагнитного привода с управлением по положению бойка, реализованная методами структурного моделирования в MATLAB Simulink с использованием численных методов. В модели учитываются нелинейные свойства применяемых магнитных материалов, потоки рассеяния и потери энергии в электромеханической системе электропривода.

Использование модели для анализа электромеханических процессов и корректировки при выборе основных элементов конструкции позволяет повысить качество проектирования однокатушечных электромагнитных приводов с упругим реверсом бойка. Приведена количественная оценка результатов имитационного моделирования. Отмечено, что процесс управления кинетической энергией на выходе импульсного электропривода целесообразно осуществлять в период рабочего хода бойка.

**Ключевые слова:** линейный импульсный электропривод; управление по положению бойка; динамическая модель; имитационное моделирование.

A simulation dynamic model of a pulsed electromagnetic drive with control by the position of the striker is proposed, implemented by structural modeling methods in MATLAB Simulink using numerical methods. The model takes into account the nonlinear properties of the applied magnetic materials, scattering fluxes and energy losses in the electromechanical system of the electric drive. The use of the model for the analysis of electromechanical processes and adjustments in the selection of basic structural elements makes it possible to improve the design quality of single-coil electromagnet drives with elastic striker reverse. A quantitative assessment of the simulation results is given. It is noted that it is advisable to control the kinetic energy at the output of a pulsed electric drive during the working stroke of the striker.

**Key words:** linear pulse electric drive; control by the position of the striker; dynamic model; simulation modelling.

### **Имитационное моделирование субсинхронного резонанса автономного энергорайона с газотурбинной установкой**

БЕЛКОВА Д.Н., АНОСОВ В.Н.

Рассматривается один из проблемных вопросов эксплуатации объектов распределенной генерации – повышенная виброактивность валов генерирующей установки автономной электроэнергетической системы (АЭЭС), что приводит к отключению газотурбинной установки (ГТУ) антивибрационной защитой. Проанализированы основные причины, вызывающие субсинхронный резонанс в АЭЭС. Представлена модель АЭЭС на основе ГТУ, силового трансформатора, линейных и нелинейных нагрузок. Получены результаты имитационного моделирования АЭЭС с тиристорным выпрямителем в качестве нелинейной нагрузки и исследовано влияние параметров жесткости и инерционности механической составляющей энергосистемы.

**Ключевые слова:** автономная электроэнергетическая система, газотурбинная установка, субсинхронный резонанс, тиристорный выпрямитель, имитационное моделирование.

One of the problematic issues of the operation of distributed generation facilities is considered – increased vibration activity of the shafts of the generating unit of the autonomous electric power system (AES), which leads to the shutdown of the gas turbine unit (GTU) with anti-vibration protection. The main causes of the subsynchronous resonance in the AES are analyzed. An EES model based on a GTU, a power transformer, linear and nonlinear loads is presented. The results of simulation modeling of AES with a thyristor rectifier as a nonlinear load are obtained and the influence of stiffness and inertia parameters of the mechanical component of the power system is investigated.

**Key words:** autonomous electric power system, gas turbine installation, subsynchronous resonance, thyristor rectifier, simulation modeling.

*Электротехника, 2024, №5, стр. 32-35*

**Пульсации электромагнитного момента синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов беспазовой конструкции**

ГЕЙНРИХ Г.О., ШЕВЧЕНКО А.Ф.

Статья посвящена исследованию пульсаций электромагнитного момента, возникающих в беспазовых магнитоэлектрических синхронных машинах. Показано влияние ширины магнитов и формы распределения МДС статора на уровень пульсаций электромагнитного момента.

**Ключевые слова:** беспазовые электрические машины, магнитоэлектрическое возбуждение, дробные обмотки, пульсации момента.

The article is devoted to the study of pulsations of the electromagnetic moment arising in phase-free magnetolectric synchronous machines. The influence of the width of the magnets and the shape of the stator MDS distribution on the level of pulsations of the electromagnetic moment is shown.

**Key words:** phase-free electric machines, magnetolectric excitation, fractional windings, moment pulsations.

*Электротехника, 2024, №5, стр. 36-39*

### **Анализ фазного напряжения асинхронного двигателя регулируемой электромеханической системы**

ГРЕЧКИН В.В., ТЕМЛЯКОВ А.А., КАВЕШНИКОВ В.М., ПОПОВ И.Л., ТЕМЛЯКОВА З.С.

В электрических системах управления двигателями напряжение, формируемое преобразователями частоты, часто содержит высшие гармоники, которые могут вызывать потери в электрической машине и, в конечном счете, привести к ее перегреву.

Напряжение, генерируемое преобразователем частоты, может не соответствовать стандартам, что требует особого внимания при разработке двигателей, предназначенных для использования с такими преобразователями. В статье выполнен анализ напряжения на выходе из преобразователя частоты в соответствии с требованиями государственного стандарта, представлена электрическая схема, по которой собирались данные, и даны рекомендации по проектированию двигателей, предназначенных для работы с преобразователями частоты.

**Ключевые слова:** регулируемая электромеханическая система, асинхронный двигатель, частотный преобразователь, гармонический состав.

In electric motor control systems, higher harmonics are often present in the voltage generated by frequency converters, which can cause losses in an electric machine and, ultimately, lead to its overheating. The voltage generated by the frequency converter may not meet the standards, which requires special attention when developing motors designed for use with such converters.

The article analyzes the voltage at the output of the frequency converter in accordance with the requirements of the state standard, presents the electrical circuit according to which data was collected, and provides recommendations for the design of motors designed to work with frequency converters.

**Key words:** adjustable electromechanical system, asynchronous motor, frequency converter, harmonic composition.

*Электротехника, 2024, №5, стр. 40-45*

### **Применение магнитопроводящего клина в конструкции статора синхронных явнополюсных машин с дробной-зубцовой обмоткой**

ПОПОВ И.Л., ТОПОРКОВ Д.М., БАБИЦКИЙ Д.Ю.

Нередко одним из требований, выдвигаемых при проектировании синхронных машин с электромагнитным возбуждением, является невысокая скорость вращения вала, но не всегда представляется возможным спроектировать машину с большим количеством полюсов в требуемых габаритах. Применение дробной зубцовой обмотки позволяет сократить количество зубцов на статоре, что, в свою очередь, позволяет уменьшить диаметр расточки статора и спроектировать машину в требуемых габаритах. В дробных зубцовых обмотках катушка охватывает один зубец, из-за чего процесс ее извлечения намного проще, чем в статорах с традиционными распределенными обмотками, что повышает ремонтпригодность машин с такими обмотками. Еще более упростить извлечение катушки можно, сделав пазы полностью открытыми, но в таком случае влияние зубчатости статора на распределение магнитной индукции окажется более сильным, чем при полужакрытых пазах, что может привести к ряду негативных последствий от увеличения потерь до нарушения синусоидальности ЭДС. В таком случае уменьшить искажение кривой магнитной индукции в воздушном зазоре можно, применив в конструкции статора клин из магнитопроводящего материала. В статье рассмотрены вопросы проектирования полюса ротора явнополюсной машины с дробной зубцовой обмоткой с открытым пазом статора. В частности, рассмотрены различные конфигурации полюса ротора в сочетании со статором с открытыми пазами, магнитопроводящим клином и без него.

**Ключевые слова:** синхронные явнополюсные машины, дробная зубцовая обмотка, ротор, полюс ротора, открытый паз, магнитопроводящий клин.

Often, one of the requirements put forward when designing synchronous machines with electromagnetic excitation is a low shaft rotation speed, but it is not always possible to design a machine with a large number of poles in the required dimensions. The use of fractional tooth winding allows you to reduce the number of teeth on the stator, which, in turn, allows you to reduce the diameter of the stator bore and design the machine in the required dimensions. In fractional tooth windings, the coil covers one tooth, which makes the extraction process much easier than in stators with traditional distributed windings, which increases the maintainability of machines with such windings. It is possible to simplify the removal of the coil even more by making the slots completely open, but in this case the effect of stator serration on the distribution of magnetic induction will be stronger than with semi-closed slots, which can lead to a number of negative consequences from increased losses to a violation of the sinusoidal EMF. In this case, it is possible to reduce the distortion of the magnetic induction curve in the air gap by using a wedge made of a magnetically conductive material in the stator design. The article considers the issues of designing the rotor pole of a single-pole machine with a fractional tooth winding with an open stator groove. In particular, various configurations of the rotor pole in combination with a stator with open slots, a magnetically conductive wedge and without it are considered.

**Key words:** synchronous single-pole machines, fractional tooth winding, rotor, rotor pole, open groove, magnetically conductive wedge.

*Электротехника, 2024, №5, стр. 46-51*

**Методика пересчета параметров погружных асинхронных двигателей, работающих в ненормальных режимах**

ТОПОРКОВ Д.М., ДОМАХИН Е.А., ФАХРЕЕВА В.В., ЛОБАЧЕВА А.С., ЧУСОВИТИН Г.Н.

Рассмотрены методы расчёта ненормальных режимов работы асинхронных двигателей, применяемых на скважинах с индивидуальными характеристиками. представлены результаты исследований, направленных на получение коэффициентов, необходимых для дальнейшего создания метода расчётов ненормальных режимов работы.

**Ключевые слова:** электродвигатели для погружных насосов, ненормальные режимы работы, дерейтинг, апрейтинг.

Methods for calculating non-nominal operating modes of asynchronous motors used in wells with individual characteristics are considered. The results of research aimed at obtaining the coefficients necessary for further creation of a method for calculating non-nominal operating modes are presented.

**Key words:** electric motors for submersible pumps, non-nominal operating modes, deriving, uprating.

*Электротехника, 2024, №5, стр. 52-57*

### **Определение параметров буферного накопителя электробуса с учетом деградации литиевого аккумулятора**

ДЕДОВ С.И., ЩУРОВ Н.И., ШТАНГ А.А., ВНУКОВ С.А., СИНГИЗИН И.И.

Проведена оценка энергоёмкости буферного накопителя энергии тяговой энергоустановки электробуса с учетом деградации литиевого аккумулятора. Синтезирована имитационная модель энергетической установки электробуса в среде MATLAB Simulink, сопоставлены между собой результаты моделирования энергоустановки без буферного накопителя и с буфером различной энергоёмкости на базе литий-титанатного аккумулятора. Внедрение буферного накопителя энергии с долей в 14,47% от общей энергоёмкости накопителя позволит увеличить ресурс аккумулятора на 32,7%.

**Ключевые слова:** электробус, буферный накопитель, комбинированная энергетическая установка, литий-железо-фосфатный аккумулятор, литий-титанатный аккумулятор, моделирование.

The energy intensity of the buffer energy storage of the electric bus traction power plant has been assessed, taking into account the degradation of the lithium battery. A simulation model of an electric bus power plant has been synthesized in the MATLAB Simulink environment, and the results of modeling a power plant without a buffer storage and with a buffer of different energy intensity based on a lithium-titanate battery have been compared. The introduction of a buffer energy storage device with a share of 14.47% of the total energy consumption of the storage device will increase the battery life by 32.7%.

**Key words:** electric bus, buffer storage, combined power plant, lithium-iron-phosphate battery, lithium-titanate battery, modeling.

## **Снижение уровня гармоник в трехуровневом однофазном автономном инверторе без использования ШИМ**

ЩУРОВ Н.И., МЯТЕЖ С.В., ЛИСИЦЫН П.С., АБРАМОВ Е.Ю., ЛАТЫШЕВ Р.Н.

Рассмотрен автономный многоуровневый однофазный инвертор без использования ШИМ и ёмкостных делителей напряжения, кривая выходного напряжения которого приближена к синусоиде и соответствует современным нормам качества электрической энергии для сетей 0,38 кВ. По сравнению с инверторами, использующими ШИМ, предлагаемый инвертор благодаря использованию малых частот переключения силовых полупроводников на уровне промышленной частоты 50 Гц и оптимальном применении амплитуд разных уровней не будет создавать значительных электромагнитных помех, и вызывать ускоренный износ изоляции подключаемого оборудования. Исследования на математической и физической моделях показали возможность получения трехуровневым автономным инвертором, построенным на базе трехстержневого магнитопровода трансформатора с пассивным  $LC$ -фильтром, содержащим последовательный резонансный контур, напряжения с допустимым для сетей 0,38 кВ коэффициентом гармоник на уровне  $K_{ГУ} \approx 6,36\%$ .

**Ключевые слова:** многоуровневый инвертор, ШИМ, гармоники, модуляция, балансировка нагрузки.

An autonomous multilevel single-phase inverter without the use of PWM and capacitive voltage dividers is considered, the output voltage curve of which is close to a sine wave and corresponds to modern standards of electrical energy quality for 0.38 kV networks. Compared with inverters using PWM, the proposed inverter, due to the use of low switching frequencies of power semiconductors at an industrial frequency of 50 Hz and the optimal use of amplitudes of different levels, will not create significant electromagnetic interference, and cause accelerated wear of the insulation of the connected equipment. Research on mathematical and physical models has shown the possibility of obtaining a three-level autonomous inverter, built on the basis of a three-core magnetic core transformer with a passive LC filter containing a sequential resonant circuit, voltage with a permissible harmonic coefficient for 0.38 kV networks at the level.

**Key words:** multilevel inverter, PWM, harmonics, modulation, load balancing.

**Имитационная модель и система управления зарядной станцией с накопителем энергии**

ШТАНГ А.А., КРАВЧЕНКО Д.П., АНДРИЯШИН С.Н., ЕРЕЩЕНКО Н.Д., АБРАМОВ Е.Ю.

Все более широкое использование электротранспортных средств приводит к необходимости расширения зарядной инфраструктуры. Без учета состояния энергосистемы это может привести к дефициту мощности систем электроснабжения и локальным перегрузкам в сети. В статье предложен способ снижения местного воздействия электрочарядных станций на сеть путем интеграции в схему электроснабжения аккумуляторной батареи в качестве буферного накопителя для снижения пиков потребления электроэнергии. Разработана имитационная модель электрочарядной станции, включающая два основных элемента: DC-DC преобразователь и аккумуляторную батарею. Методом систем подчиненного регулирования выполнен синтез системы автоматического управления электрочарядной станции для режимов заряда постоянным напряжением и постоянным током. Синтезированная система управления удовлетворяет требуемым показателям качества.

**Ключевые слова:** электрочарядная станция, накопитель энергии, литий-ионная аккумуляторная батарея, преобразователи мощности, понижающий преобразователь.

The increasing use of electric vehicles leads to the need to expand the charging infrastructure. Without taking into account the state of the power system, this can lead to a shortage of power supply systems and local overloads in the network. The article proposes a way to reduce the local impact of electric charging stations on the network by integrating a battery into the power supply scheme as a buffer storage device to reduce peaks in electricity consumption. A simulation model of an electric charging station has been developed, which includes two main elements: a DC-DC converter and a rechargeable battery. The synthesis of an automatic control system of an electric charging station for charging modes with constant voltage and constant current was performed using the method of subordinate control systems. The synthesized control system meets the required quality indicators.

**Key words:** electric charging station, energy storage, lithium-ion battery, power converters, step-down converter.

*Электротехника, 2024, №5, стр. 74-75*

**Авторы номера**