

**Исследование пульсаций момента вентильно-индукторного двигателя при регулировании среднего значения момента в зоне малых скоростей**  
КРАСОВСКИЙ А.Б.

При регулировании среднего значения момента вентильно-индукторных двигателей пульсации момента наиболее заметны в зоне малых скоростей. В этой зоне фазные токи двигателя обычно принудительно ограничивают, поэтому за счет имеющегося запаса по напряжению при надлежащем выборе положений коммутации фаз можно в некоторых пределах влиять на форму фазных токов и благодаря этому добиваться снижения пульсаций момента. В статье рассмотрены возможности снижения пульсаций момента при использовании наиболее распространенных способов ограничения фазного тока «voltage control» и «current control». С применением имитационного моделирования в среде Matlab-Simulink найдены наилучшие сочетания управляющих воздействий, при которых пульсации момента минимальны. Показано, что при использовании первого способа ограничения фазного тока снижение пульсаций момента при определенных условиях достигается при принудительном затягивании интервала нарастания фазного тока за счет более позднего включения фазы с одновременным повышением напряжения на ней. В ряде случаев желаемый эффект достигается только за счет определенной задержки подачи команды на отключение фазы по отношению к положению, соответствующему режиму одиночной коммутации. Для второго способа ограничения фазного тока найдены наилучшие условия коммутации для фиксированных уровней ограничения тока, определяемых из желаемых значений среднего момента двигателя, и независимо от регулирования положений включения и отключения его фаз.

*Ключевые слова:* вентильно-индукторный двигатель, регулирование среднего момента, ограничение фазного тока в зоне малых скоростей, пульсации момента, имитационное моделирование, алгоритмы регулирования.

At control of average torque of the switched reluctance motor of a torque ripple are most appreciable in a zone of low speeds. In this zone phase currents of the motor usually compulsorily limit, therefore at the expense of an available stock on pressure at an appropriate choice of positions switching of phases it is possible to influence in some limits the form of phase currents and at the expense of it to achieve decrease in pulsations of the torque. In article possibilities of decrease in torque ripple are considered at use of the most widespread ways of restriction of a phase current «voltage control» and «current control». With application of simulation in MATLAB – SIMULINK the best combinations of operating influences at which minimum torque ripple are found. It is shown that at use of the first way of restriction of a phase

current decrease in torque ripple is under certain conditions reached at a compulsory tightening of an interval of increase of a phase current at the expense of later inclusion of a phase with simultaneous increase of pressure on it. In some cases, the desirable effect is reached only at the expense of a certain delay of giving of a command on phase switching-off in relation to the position corresponding to a mode of single switching. For the second way of restriction of a phase current, the best conditions of switching for the fixed values of levels of restriction of the current, defined of desirable values of the average moment of the motor, and independent regulation of positions of inclusion and switching-off of its phases are found.

*Key words:* switched reluctance motor, control of average torque, limit of phase current in the zone of low speeds, torque ripple, simulation, algorithms of control.

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 8-13*

#### **Судовые единые электроэнергетические системы**

СЕНЬКОВ А.П., ДМИТРИЕВ Б.Ф., КАЛМЫКОВ А.Н., ТОКАРЕВ Л.Н.

В последние два десятилетия в судостроении происходили быстрые и радикальные изменения, связанные с совершенствованием и применением гребных электрических установок (ГЭУ). Создание преобразователей частоты большой мощности, винторулевых колонок, гребных установок «Азипод» намного повысили качественные характеристики ГЭУ. В настоящее время ГЭУ нашли применение на судах практически всех видов. Электроэнергетические системы современных судов с электродвижением строятся как единые электроэнергетические системы (ЕЭЭС), обеспечивающие питанием и ГЭУ, и многочисленные общесудовые потребители. В статье рассмотрены достоинства и недостатки трех вариантов структур судовых ЕЭЭС: широко применяемой на судах ЕЭЭС с трансформатором в составе ГЭУ; ЕЭЭС фирмы Вяртсиля и ЕЭЭС, предложенная Санкт-Петербургским морским техническим университетом. Показано, что во всех трех вариантах ЕЭЭС качество напряжения питания гребных электродвигателей и общесудовых потребителей примерно одинаковое, однако два последних варианта ЕЭЭС позволяют исключить трансформаторы из состава ГЭУ, что дает возможность снизить стоимость, массу и габариты электрооборудования судна, снизить расход топлива и освободить некоторый объем судовых помещений.

*Ключевые слова:* судовая единая электроэнергетическая система, судовая электростанция, преобразователи частоты, гребные электрические установки.

In the last two decades in shipbuilding had occurred rapid and radical changes associated with the improvement and application of electrical propulsion system (EPS). The creation of high-power frequency converters, propeller-rudder columns, propulsion equipment “Azipod” improved quality characteristics of the EPS. Currently, the EPS have found application in the all types of ships. Propulsion systems of the modern ships with electric motion are built as single propulsion systems (SPS). In the article is described advantages and disadvantages of a three variants structure of the marine SPS: widely using in ships SPS with transformer as part of EPS; SPS of a company “Vyartsilya” and SPS proposed by State Marine Technical University of St. Petersburg. It is shown that in all three variants SPS the power quality of electrical propulsion motors and general ship consumers the similar. However, the last two variants SPS allow to exclude transformers from the EPS it gives the opportunity to reduce the cost, weight and sizes of electric system, also to reduce fuel consumption and to release some ship spaces.

*Key words:* ships unified power systems, ship's power plant, frequency converters, rowing electrical installations.

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 14-18*

### **Особенности реализации тягового электрооборудования гусеничного промышленного трактора мощностью 160 л.с.**

ВИНОГРАДОВ А.Б., ГНЕЗДОВ Н.Е., ЧИСТОСЕРДОВ В.Л.

Представлены результаты разработки электроприводов тяговых двигателей и мотор-генератора гусеничного промышленного трактора мощностью 160 л.с. Приведена функциональная схема комплекта тягового электрооборудования и рассмотрены особенности двигателей и преобразовательного блока - необходимость пятикратного регулирования скорости ротора и частоты напряжения статора вверх от номинальной, требуемое регулирование тока намагничивания от 8 до 80 А, широкий диапазон изменения индуктивности, активного сопротивления статора и ротора, постоянной времени ротора, существенные потери в стали. Особое внимание уделено настройке датчиковой системы. В результате погрешность датчиков тока статора внизу диапазона снижена с 12-18% до 1%, а алгоритм и методика настройки пофазной компенсации «мёртвого» времени обеспечили формирование напряжения статора с погрешностью менее 1%, в том числе на уровнях напряжения в единицы вольт. Разработана методика точного определения индуктивности и потерь в стали в области небольших токов

намагничивания. Решена проблема влияния коммутаций в инверторах тяговых приводов на измерение и регулирование приводом мотор-генератора напряжения в общем звене постоянного тока. Указанные меры и учёт потерь в стали в алгоритмах управления электроприводами обеспечили выполнение требований технического задания по реализуемым моментам во всем диапазоне скоростей с погрешностью идентификации параметров двигателя и электромагнитного момента не более 10%. Разработанный комплект тягового электрооборудования успешно выдержал стендовые, заводские и полевые испытания.

*Ключевые слова:* тяговый электропривод, точность измерений, потери в стали, электромагнитная совместимость.

The development results of traction motor and generator electric drives for caterpillar industrial tractor with 160 horsepower are presented. Considered the functional scheme of traction electrical equipment set and features of motors and invertors, in particular requirement of rotor speed and stator voltage frequency control five times more than rated one, required control of magnetizing current from 8 to 80 A, wide variation range of inductance, stator and rotor active resistance, rotor time constant, significant iron loss. Special attention is given to sensor system adjustment. As a result current sensor inaccuracy was reduced from 12-15% to 1% in bottom part of range. Algorithm and tuning methods of phase-by-phase dead time compensation provide stator voltage generation with inaccuracy less than 1% on level of 1-2 volts too. Method of accuracy definition of inductance and iron loss at low magnetizing current values is developed. The problem of traction drive inverters commutation impact to measurement and regulation of common dc link voltage by motor-generator is solved. Mentioned steps and regard of iron loss in electric drive control algorithms provide availability, achievement of required torque in full range of speed with inaccuracy of motor parameters identification and torque calculation less than 10%. Created traction electrical equipment set passed stand, plant and field test as a part of tractor successfully.

*Key words:* traction drive, precision of measurements, iron loss, electromagnetic compatibility.

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 18-24*

**Математическое моделирование и определение параметров регулирования линейной электрической машины возвратно-поступательного действия**

КОЛПАХЧЬЯН П.Г., ЩЕРБАКОВ В.Г., КОЧИН А.Е., ШАЙХИЕВ А.Р.

Рассмотрена линейная электрическая машина (ЛЭМ) возвратно-поступательного действия предназначенная для использования в качестве электрогенератора совместно со свободнопоршневым двигателем внутреннего сгорания (ДВС). С учетом тяжелых условий работы электрической машины (ЭМ) в непосредственной близости от цилиндра ДВС, в зонах высоких температур, и значительные механические нагрузки, предложено использовать ЭМ вентильно-индукторного типа. Указано, что одной из наиболее сложных задач при создании такой машины является разработка системы управления.

Рациональные принципы и алгоритмы регулирования рассматриваемой машины, настройки системы управления и оценки энергетических показателей предложено определять на основе математической модели электромагнитных процессов. С учетом особенностей линейной вентильно-индукторной машины как объекта моделирования разработана математическая модель, предназначенная для решения указанных задач. Поскольку фазы статора имеют отдельные магнитопроводы и не связаны в магнитном отношении, электромагнитные процессы в каждой фазе рассматриваются независимо. Для экспериментальной проверки положений, принятых при проектировании, изготовлен экспериментальный образец машины, для которого опытным путем были определены параметры, необходимые для моделирования – зависимости характеристик потокосцепления фазы и развиваемого усилия от тока фазы при различных положениях подвижного элемента. Приведены результаты исследований процессов в машине при низких частотах перемещений подвижного элемента, полученные экспериментальным путем и с использованием математической модели. С помощью математической модели выполнен анализ работы линейной вентильно-индукторной ЭМ возвратно-поступательного действия при частотах перемещения подвижного элемента, невозможных для исследования на испытательном стенде. Определены рациональные параметры токовых импульсов фаз машины, выполнена оценка ее энергетических показателей. Полученные результаты подтвердили правильность принятых подходов в проектированию, выбору принципов регулирования и настройке системы управления линейной вентильно-индукторной машины возвратно-поступательного действия и возможность ее использования в качестве электрогенератора совместно со свободнопоршневым ДВС.

*Ключевые слова:* линейная электрическая машина, вентильно-индукторная электрическая машина, математическая модель, линейный возвратно-поступательный электрогенератор.

The paper deals with the design of the linear reciprocating electrical machine intended for use as an electric generator in conjunction with a free-piston internal combustion engine. Considering severe conditions of operation of the electrical machine in the vicinity of the internal combustion engine in the high temperature zone, and considerable mechanical load, the electrical machine is proposed to use switch-reluctance type. It is indicated that one of the most difficult tasks when design a linear electric machine is the development of control systems. To determine the rational principles and control algorithms under consideration electric machine control system settings and evaluation of energy performance provided the use of a mathematical model of electromagnetic processes. Given the characteristics of the linear switch-reluctance electrical machine as a simulation object mathematical model designed to solve these problems. Since the phase of the stator yokes are separate and not connected magnetically, electromagnetic processes are considered in each phase independently. For experimental verification of the provisions adopted in the design of experimental model was manufactured under consideration of the electrical machine, for which empirically identified the parameters required for the simulation: the family of phase flux linkage characteristics and force that the current phase at different positions of the movable element. Results of studies of processes in the given electrical machine at low frequency movements of the movable member obtained using the mathematical model and by experiment. With the help of the mathematical model used to analyze the work of the linear reciprocating switch-reluctance electrical machines at frequencies of the movable element impossible for the study on the test bench. The rational parameters of current pulses phase electrical machines under consideration, the estimate of its energy performance. The results confirmed the correctness of the approach adopted in the design, choice of control principles and configuration of the control system of the linear reciprocating switch-reluctance electric machines action and the possibility of its use as an electric generator in conjunction with a free-piston internal combustion engine.

*Key words:* linear electrical machine, switch-reluctance electrical machine, mathematics model, linear reciprocate electric generator

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 25-31*

**Аналитическая модель эмиссии гармоник тока намагничивания силовым трансформатором при воздействии квазипостоянных токов**

КУВШИНОВ А.А., ВАХНИНА В.В., ЧЕРНЕНКО А.Н., РЫБАЛКО Т.А.

Обоснована допустимость кусочно-линейной аппроксимации с одной точкой излома ветви

намагничивания силового трансформатора для исследования процессов одностороннего насыщения магнитной системы в периоды повышенной геомагнитной активности, вызванных возмущениями космической погоды. Предложена интегральная количественная характеристика кусочно-линейной аппроксимации, учитывающая особенности основной кривой намагничивания электротехнической стали и конструктивные особенности магнитной системы силового трансформатора. Построена аналитическая модель, позволяющая определять мгновенные значения и гармонический состав тока намагничивания при различной интенсивности квазипостоянных токов. Определены два характерных уровня геомагнитной активности, при одном из которых максимальны четные гармоники тока намагничивания, при другом - максимальна основная гармоника тока намагничивания, многократно превышающая паспортное значение тока холостого хода силового трансформатора.

*Ключевые слова:* силовой трансформатор, ток намагничивания, гармоники, квазипостоянный ток.

The article validates the possibility of the piecewise linear approximation with one break point of the magnetizing characteristic of power transformer for studying of unilateral saturation of magnetic system in periods of high geomagnetic activity caused by space weather disturbances. In the article is given the quantitative integral characteristic of a piecewise linear approximation, which is taking into account the features of the basic magnetization curve of electrical steel and structural features of the magnetic system of the power transformer. Developed an analytical model which allows determine the instantaneous values and harmonic structure of the magnetizing current at the different intensity quasi currents. Defined the two specific levels of geomagnetic activity, first one with a maximum even harmonics of the magnetizing current, and second one with the greatest fundamental harmonic magnetizing current is much greater than the certified value of the load current of the power transformer.

*Key words:* power transformer, magnetizing current, harmonics, quasi-current.

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 31-34*

**Определение остаточного ресурса линий электропередачи с изоляцией из сшитого полиэтилена**

ПОЛЯКОВ Д. А., КОЩУК Г. А., НИКИТИН К. И.

Все более широкое распространение получают кабели и провода с изоляцией из сшитого полиэтилена. В связи с этим возникает необходимость в контроле состояния изоляции на протяжении всего срока ее эксплуатации. При использовании современной техники становится возможным онлайн-мониторинг воздействий на изоляцию и определение ее остаточного ресурса. В статье предложена методика определения остаточного ресурса сшитой полиэтиленовой изоляции линий электропередачи. Использовалась разработанная на предыдущем этапе исследований модель старения изоляции. Предлагается контролировать деструктивные воздействия на изоляцию и рассчитывать на основе полученных данных остаточный ресурс. Результаты исследований показали, что вероятность пробоя подчиняется нормальному характеру распределения (распределению Гаусса), так как изоляция в процессе эксплуатации подвергается большому количеству воздействий (частичным разрядам, термическому воздействию, воздействию факторов окружающей среды и др.). Остаточный ресурс определяется функцией обратной вероятности пробоя. Предложенная методика может быть использована для разработки комплекса устройств, определяющего остаточный ресурс полиэтиленовой изоляции.

*Ключевые слова:* кабельная линия электропередачи, полиэтиленовая изоляция, остаточный ресурс, статистический расчет, старение изоляции, пробой изоляции

XLPE-insulated cables and wires are becoming more widespread. In this connection it is necessary to make the control of insulation condition throughout its operating lifetime. By using modern technology it becomes possible to conduct online monitoring of insulating impacts and determine its residual life. The paper proposes a technique of determining the residual life of cross-linked polyethylene insulation of power lines. The model of insulation aging developed in the previous stage of the research is used. It is proposed to control the destructive effects on the insulation and count the remaining service life based on the data obtained. The results showed that the probability of breakdown is the normal character of distribution (Gaussian distribution) as well as insulation during operation is subjected to a large number of effects (partial discharges in insulation, thermal effects, ambient effects and others.). The remaining resource is defined as a function of the inverse breakdown probability. The proposed technique of the insulation residual life calculating can be used in practice for the development of a complex of devices, determining the residual life of the polyethylene insulation.

*Key words:* polyethylene insulation, residual life, statistical calculation, insulation aging, insulation breakdown.



*Электротехника, 2017, № 5, стр. 35-40*

**О возможностях динамической оценки температуры контактной поверхности при импульсных токовых нагрузках**

БЕКБАЕВ А.Б., САРСЕНБАЕВ Е.А. ТИТКОВ В.В.

Статья посвящена мониторингу состояния контактных соединений шин силовых электроустановок. Стационарные измерения температуры шин в рабочем режиме установки не позволяют с достаточной точностью диагностировать качество контактного соединения, например, измерить переходное сопротивление вследствие высокой теплопроводности материала ошиновки, приводящей к существенному выравниванию поля температуры вдоль шины. Предлагается использовать динамические измерения температурных режимов установки, возникающих в частности при отключении тока короткого замыкания, пуске электродвигателей и т.п. Температурные поля вблизи контактного соединения, возникающие в процессе протекания больших кратковременных токов, отличаются от стационарных полей существенно большей контрастностью, что заметно повышает возможности его диагностики. Наибольший интерес представляет максимальные значения температуры контактирующих поверхностей шинного соединения, недоступной для прямых измерений. Рассмотрены критерии качества контактного соединения плоских шин и алгоритм определения температуры контактного соединения, определяемые по данным зависимости температуры от времени, регистрируемой на внешней поверхности шины вблизи контакта при отключении тока короткого замыкания. Для анализа нестационарных полей плотности тока и температуры в области контакта использованы численные методы моделирования и известные аналитические результаты теории теплопередачи.

*Ключевые слова:* шина, контактная поверхность, импульсная нагрузка, мониторинг температуры.

The article focuses on some problems of monitoring the condition of contact surfaces of power electrical installation buses. Stationary temperature measurements at operating mode of installation does not allow to diagnose contact connection quality with necessary accuracy, for instance, transient resistance, due to high thermal conductivity of a busbar material, leading to a significant leveling of a temperature field along the bus. The article proposes using the dynamic

measurements of the installation temperature modes, appearing, for example, while short circuit current shutdown, electrical machine start etc. Temperature fields near contact connection, appearing during the flow of big, short-timed currents, differs from the stationary ones by a significantly higher contrast, which remarkably increases possibilities of its diagnostics. The most interest are the maximum temperature values of bus connection contact surfaces, unavailable for direct measurements. In this study the criteria of the plain buses contact connection quality and the algorithm of defining the temperature of contact connection, determined by a data of dependence of temperature from time, registered upon the outer bus surface near the contact while short-circuit current shutdown, are proposed. For the analysis of non-stationary current density fields and temperatures within the contact area a numerical modeling methods and known analytical results from heat transfer theory are used.

*Key words:* busbar, contact surface, pulse loading, temperature monitoring.

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 41-45*

### **Критериальная комплексная оптимизация в электроэнергетических системах**

СОЛОПОВ Р.В

Предложен метод критериального программирования для решения оптимизационных электроэнергетических задач, основанный на методиках теории подобия, критериального анализа и геометрического программирования. Основные преимущества метода критериального программирования заключаются в использовании критериев технико-экономического подобия и возможности решения задач любой степени трудности, при этом целевая функция и ограничения различного типа могут быть представлены в произвольном вещественном виде без дополнительных преобразований, что упрощает постановку оптимизационной задачи и дает возможность учесть большее количество оптимизируемых параметров. Методика критериального программирования разработана для решения задач оптимального управления электроэнергетической системой с целью повышения надежности и экономичности ее работы. Рассмотренные в статье примеры показывают принципиальную взаимосвязь между техническими и экономическими параметрами, характеризующими состояние электроэнергетических систем, и позволяют выявить основные технико-экономические закономерности сложных электроэнергетических систем. Представленные в статье возможности метода критериального программирования расширяют круг решаемых задач технико-

экономического и математического анализа в электроэнергетике и могут быть использованы в других отраслях науки.

*Ключевые слова:* критерии подобия, оптимизация, технико-экономический анализ, обобщенные переменные, ограничения целевой функции, функция Лагранжа, узловый баланс мощности, комплексная оптимизация.

The method of criterial programming was suggested for solving optimization problems in power systems. This method is based on the similarity theory, criteria based analysis and geometric programming. The main advantages of the method of criterial programming consists in the use of criteria of technical and economic similarity and the possibility to solve problems of any difficulty. The objective function and limitations of different types may be present in any real form without additional changes. It simplifies the formulation of the optimization problem and makes it possible to take into account more optimization parameters. The method of criterial programming is developed to solve problems of optimal control of electric power system in order to improve the reliability and efficiency of its work. The examples in the article show the fundamental relationship between the technical and economic parameters characterizing the condition of the electric power systems. They allow to reveal the main technical and economic patterns of complex electrical power systems. The possibilities of criterial programming expand the range of problems of technical and economic analysis in the electric power system. These possibilities also can be used in the other fields of science.

*Key words:* similarity criteria, optimization, technical and economic analysis, generalized variables, limitations of the objective function, the Lagrange function, nodal balance of power, complex optimization.

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 46-49*

### **Магнитный метод обнаружения разрывов проволок в стальных канатах**

НЕМЦОВ М.В., ТРИФАНОВ Г.Д.

Подъемные канаты из стальной ферромагнитной проволоки в процессе эксплуатации подвержены износу. Одним из критериев состояния каната является число, распределение и скорость накопления разрывов проволок. Чаще рвутся проволоки наружного слоя, а в прядевых канатах – еще и на границе внешних прядей и стального сердечника. Для

обнаружения разрывов проволок используется магнитный метод, реализуемый при помощи дефектоскопов на основе постоянных магнитов. Контролируемый участок каната между магнитными полюсами намагничивается до индукции технического насыщения. В месте разрыва проволоки над поверхностью каната образуется магнитное поле рассеяния, наличие которого, а, следовательно, и разрыва проволоки, фиксируют датчики Холла или индукционные датчики (измерительные катушки индуктивности), располагаемые вблизи поверхности каната в измерительных узлах. Поле рассеяния имеет малую интенсивность и область локализации и конструктивно недоступно для экспериментального исследования. Это затрудняет проектирование эффективных измерительных систем. Анализ метрологических характеристик дефектоскопов большинства производителей свидетельствует об их малой чувствительности к разрывам проволок. В статье обосновывается возможность оптимизации параметров измерительного узла с индукционным датчиком для повышения достоверности обнаружения разрывов проволок в стальных канатах на основе математического моделирования поля рассеяния. Сформулированы требования, позволяющие оптимизировать параметры измерительных узлов.

*Ключевые слова:* стальные канаты, дефектоскопия, намагничивание, поле рассеяния, индукционные датчики, математическое моделирование

Lifting cables made of ferromagnetic wires are subject to wear throughout the process of exploitation. One of the criteria on the condition of the cable is the number, distribution and the accumulation speed of ruptures in the wire. More often the wires on the surface level are subject to rupture, and in plaited cables - on the border between the exterior plaits and the steel core. A magnetic method is used to discover the rupture in the wires, that is realized by using defectoscopes based on constant magnets. That part of the cable that is under investigation and located between two magnetic poles is magnetized till induction of technical saturation. Meanwhile on the wire rupture location over the cable a scattering magnetic field is formed. The presence of a scattering field and consequently, the wire rupture is registered by Hall sensors, or inductive sensors (measuring inductive coil), located near the wire surface in measuring units. The scattering field has a low intensity, small locality, and inaccessible for experimental investigation. This impedes the design of effective measuring units. A review of the literature related to the metrological characteristics of defectoscopes by the majority of their producers show their low sensitivity level to wire ruptures. The article provides a basis for the possibility of optimizing the parameters of the measuring unit with an inductive sensor, in order to raise the

authenticity level of discovering ruptures in the wires of a steel cable on the basis the mathematical modeling of a scattering field. The demands and requirements allowing the parameter optimization of measuring units is formalized.

*Key words:* steel cables, fault detection, magnetizing field, scattering field, induction sensors, mathematical modeling

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 50-52*

### **Защита персонала энергообъектов от воздействия электрических полей промышленной частоты**

**КОЛЕЧИЦКИЙ Е.С.**, КОРОЛЕВ И.В., БУРДЮКОВ Д.А., ЧУВИРОВА С.А.,  
КОНДРАТЬЕВА О.Е.

Рассмотрены способы уменьшения неблагоприятного воздействия электрического поля промышленной частоты на персонал различных энергообъектов. Для уменьшения наводимого в теле человека тока предложено индивидуальное средство защиты от воздействия электрического поля промышленной частоты – заземленная каска. Показано, что ток, стекающий с человека, уменьшается в 1,5 и более раз. Исследовались два вида заземленных касок с различными проводящими слоями. Предложена конструкция переносного заземлителя, который позволил бы работнику беспрепятственно перемещаться по территории электроустановок и обслуживать их. Результаты экспериментов подтвердили расчетные данные: использование в качестве индивидуального электростатического экрана заземленной проводящей каски позволяет уменьшить стекающий с человека ток.

*Ключевые слова:* электрические поля, индивидуальный металлический экран, переносной заземлитель.

In work reduction of an adverse effect of electric field of industrial frequency by personnel of various power facilities is considered. For reduction of the person of current induced in a body the individual remedy from impact of electric field of industrial frequency – the grounded helmet is offered. During researches it is shown that the current which is flowing down from the person decreases in 1,5 and more times. Two grounded helmets with various conductor layers were researched. It is offered and is this reasons for the choice of a design of a

figurative grounding conductor which would allow the worker to move and serve electroinstallations freely. Experimental data have confirmed settlement: use in quality of the individual electrostatic screen the grounded carrying-out helmet allows to reduce the current which is flowing down from the person.

*Key words:* electric fields, individual metal screen, portable grounding conductor

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 53-59*

### **Схема замещения двухобмоточного автотрансформатора с отображением на ней магнитных потоков**

ШАКИРОВ М.А.

Предложены основы новой теории двухобмоточного автотрансформатора с получением универсальной 4Т-образной схемы замещения. Универсализм проявляется в отображении в схеме всех магнитных потоков в окне, магнитопроводе, а также в области между ним и баком автотрансформатора в случае насыщения стали, при любых нагрузках. С помощью новой схемной модели показано, что в магнитопроводе короткозамкнутого автотрансформатора возникают сверх- и антипоток по сравнению с потоком холостого хода. Доказано, что эти потоки могут существенно превышать соответствующие потоки в короткозамкнутых трансформаторах. Сделан вывод о необходимости совершенствования теории автотрансформатора. Показано, что решение проблемы возможно только при более глубоком понимании физических основ работы этих устройств.

*Ключевые слова:* автотрансформатор, схема замещения, первичная и вторичная обмотки, магнитный поток, короткое замыкание, холостой ход.

The paper presents the foundations of a new theory of two-winding autotransformer with obtaining the universal 4T-shaped equivalent circuit. The Universalism of the circuit is manifested in mapping of the magnetic fluxes in the window and in the yoke of the autotransformer and also in area between him and the tank of autotransformer in case of saturation was become, at any loading. With it is shown that in the magnetic circuit of a short-circuited autotransformer appear super- and antifluxes in compared with the fluxes when idle. It is proved that these fluxes can be substantially higher than the corresponding fluxes in the short-circuited transformers. A conclusion is drawn about the need of revise the autotransformer theory. It is

shown that the problem can be solved only through gaining a deeper insight in the physical principles of transformer and autotransformer operation.

*Key words:* autotransformer, equivalent circuit, primary and secondary windings, magnetic flux, short circuited, idling.

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 60-66*

### **Сравнительные оценки энергетических свойств работы асинхронного электропривода в переходных процессах**

СИМАКОВ Г.М. ФИЛЮШОВ Ю.П.

В статье показана возможность более экономичного управления асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором, чем при формировании электромагнитного момента в условиях стабилизации потока сцепления. Выполнен сравнительный анализ энергетических характеристик работы асинхронной машины при различных управлениях в одинаковых условиях. Одно управление, обеспечивая предварительное намагничивание двигателя, осуществляет формирование электромагнитного момента при стабилизации потокосцепления ротора в первой зоне регулирования, обеспечивая переход во вторую зону с ростом скорости. Другое управление, в соответствии с разработанным методом последовательного синтеза, не осуществляя предварительного намагничивания двигателя, при низкой скорости вращения ротора обеспечивает формирование электромагнитного момента при минимуме суммарных потерь. С ростом скорости, формирование электромагнитного момента осуществляется при стабилизации КПД за счет снижения реактивной мощности в функции скорости вращения ротора. При дальнейшем росте скорости, управление выполняется при минимуме реактивной мощности не зависимо от нагрузки двигателя. Выполнено сравнение энергетических свойств работы двигателя в зависимости от нагрузки и скорости при различных управлениях. Рассмотрено изменение энергетических свойств работы электропривода при формировании угловой скорости двигателя до величины двойного номинала в условиях ограничения напряжения источника питания.

*Ключевые слова:* электропривод переменного тока, асинхронная машина, регулирование энергетических свойств в функции скорости вращения ротора, сравнение основных свойств электропривода.

The article shows the possibility of more effective control of an asynchronous machine with a squirrel-cage rotor than in the formation of an electromagnetic moment in conditions of flux-linkage stabilization. Two methods of an asynchronous machine control are compared in the similar conditions. One control performs the formation of an electromagnetic moment in stabilization of the rotor flux-linkage to the first control zone, ensuring a transition to the second zone. Other control, in accordance with the developed method of sequential synthesis, without pre-magnetizing the motor, at a low rotational speed of the rotor ensures the formation of an electromagnetic moment with a minimum of total losses. When the speed is increasing, the formation of the electromagnetic moment is providing under stabilization of efficiency by reducing of reactive power in rotation speed of rotor function. With a further speed increasing, control is carried out with a minimum of reactive power, regardless of the engine load. A comparison is made for the energy characteristics of the engine operation related to the load under various controls. We have considered variation of energy characteristics of electric drive operation under formation of the angular velocity to the doubled nominal value and limitation of voltage of the power source.

*Key words:* AC electric drive, asynchronous machine, regulation of energy properties as a function of rotor speed, comparison of the main properties of the electric drive.

*Электротехника, 2017, № 5, стр. 67-74*

**Высоковольтные транзисторно-конденсаторные источники питания мощных СВЧ приборов с импульсно-периодическим выходным напряжением**

ВАНЯЕВ В.В., КОПЕЛОВИЧ Е.А., ТРОИЦКИЙ М.М.

Рассмотрены вопросы разработки высоковольтных источников питания (ВВИП), для мощных СВЧ приборов (магнетронов и гиротронов), обеспечивающих как непрерывный, так и импульсно-периодический режим генерации СВЧ излучения. Источники питания выполнены на базе транзисторно-конденсаторных преобразователей постоянного напряжения, что обеспечивает параметрическую устойчивость и безопасность системы «ВВИП – мощный СВЧ прибор» в штатном и аварийном режимах работы благодаря падающей внешней характеристики ВВИП данного типа. Предложены и обоснованы математические модели замкнутой системы автоматического регулирования «ВВИП – мощный СВЧ прибор», описывающей процессы на разных этапах формирования



импульсов выходного напряжения ВВИП. Выполнено аналитическое описание системы «ВВИП – мощный СВЧ прибор» с использования метода управляемой инъекции тока. Методом асимптотических логарифмических амплитудных частотных характеристик синтезирована структура последовательных корректирующих устройств, параметры которых определяются условиями ограничения в заданных пределах неустойчивости выходного напряжения и тока, а также требуемыми динамическими показателями формируемых импульсов. С учетом полученных результатов создан ряд ВВИП для технологических и исследовательских СВЧ комплексов. В качестве примера приведены основные технические характеристики ВВИП мощностью 60кВт для гиротрона и ВВИП мощностью 20 кВт для технологического магнетрона.

*Ключевые слова:* высоковольтный источник питания, мощный СВЧ прибор, транзисторно-конденсаторный преобразователь, математическая модель, система автоматического регулирования, корректирующее устройство.

The article discusses the development of high voltage power supplies (HVPS), providing both continuous and pulse-periodic mode of generation of microwave radiation, two types of high-power microwave devices: magnetrons and gyrotrons. HVPS is made on the basis of transistor-capacitor converters DC voltage, which provides parameter stability and security of the system "HVPS – high-power microwave device" in normal and emergency modes of operation due to falling external characteristics of this HVPS type. Proposed and substantiated the mathematical model of a closed system of automatic control " HVPS – high-power microwave device", describes the processes at different stages of the HVPS pulse output voltage. Achieved an analytical description of the system "HVPS - high-power microwave device" to use the method of controlled current injection. The method of asymptotic LAFC synthesized structure consistent corrective devices, whose parameters are determined by the conditions restrictions within the specified limits of instability of the output voltage and current, as well as the required dynamic performance of the generated pulses. Taking into account the obtained results a number of HVPS established for industrial and research microwave systems. As an example, are described technical characteristics of HVPS (power 60kW) for gyrotron and HVPS (power 20 kW) for technological magnetron.

*Key words:* high voltage power supply, high-power microwave device, transistor-capacitor converter, mathematical model, automatic control system, correction device.

**Программный комплекс для моделирования электроэнергетических систем произвольной конфигурации**

КАВАЛЕРОВ Б.В., ОДИН К.А.

Рассмотрен программный комплекс для моделирования электроэнергетических систем (ЭЭС) произвольной конфигурации в нормальных и аварийных режимах работы, в том числе испытаний алгоритмов управления элементами ЭЭС, а также самой энергосистемой. Одной из частных задач комплекса является автоматизация испытаний газотурбинных установок (ГТУ), предварительного испытания и настройки систем автоматического управления (САУ) ГТУ во всех режимах работы электростанций (автономно, параллельно, на мощную сеть). Описывается архитектура программного комплекса и модуля оптимизации как платформы для реализации различных оптимизационных задач, например, таких как автоматическая настройка САУ, выбор оптимального расположения и состава генерирующих агрегатов, распределение нагрузки в энергосистеме, оптимизация качественных показателей электроэнергии, настройка систем автоматики и релейной защиты и т.д.

*Ключевые слова:* электроэнергетическая система, газотурбинная электростанция, система автоматического управления, математическое моделирование, программный комплекс, архитектура.

The paper presents mathematical modeling of power systems of any configuration for the power system model tests in the normal and emergency modes, including test control algorithms elements of the power system, as well as of the grid. One of the special directions of the complex is the automation of the gas turbine tests, pre-test and tuning automatic control system of gas-turbine in all operating modes of power plants (independently, in parallel, to a powerful network). It describes the architecture of developed software and module optimization as a platform for various tasks, such as automatic tuning of automatic control systems, selection of the optimal location and types of generating units, load distribution in the power system, optimization of the quality indicators of electricity, tuning automation systems and relay protection, etc.

*Key words:* power system, gas turbine power plant, automatic control system, mathematical simulation, software package, architecture.