

## **Содержание**

*Электротехника, 2022, №1, стр. 2-6*

### **Об устойчивости двухмассовых электромеханических систем с магнитными муфтами**

САПСАЛЕВ А.В., ХАРИТОНОВ С.А., АЧИТАЕВ А.А.

На основе представления силового действия магнитного поля между полумуфтами как безынерционной упругой связи сформирована структурная схема двухмассовой электромеханической системы (ДЭМС) с магнитной муфтой. Для линеаризованной системы на основании формулы Мэйсона получена передаточная функция между электромагнитным моментом, создаваемым двигателем, и выходной угловой скоростью. По критерию Гурвица рассмотрена устойчивость линейной электромеханической системы. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что линеаризованная ДЭМС с магнитной муфтой без внешних обратных связей всегда устойчива. В среде объектно-визуального моделирования MATLAB Simulink проанализированы переходные процессы в нелинейной и линеаризованной системах.

**Ключевые слова:** двухмассовая электромеханическая система, магнитная муфта, постоянные магниты, структурная схема, передаточная функция, устойчивость.

Based on the representation of the force action of the magnetic field between the coupling halves as an inertialess elastic coupling, a block diagram of a two-mass electromechanical system (DEMS) with a magnetic coupling is formed. For a linearized system, based on Mason's formula, a transfer function is obtained between the electromagnetic torque generated by the motor and the output angular velocity. According to the Hurwitz criterion, the stability of a linear electromechanical system is considered. The analysis allows us to conclude that a linearized DEMS with a magnetic coupling without external feedbacks is always stable. Transients in nonlinear and linearized systems are analyzed in the MATLAB Simulink object-visual modeling environment.

**Key words:** two-mass electromechanical system, magnetic coupling, permanent magnets, block diagram, transfer function, stability.

*Электротехника, 2022, №1, стр. 7-11*

### **Магнитоэлектрический вентильный двигатель с магнитной асимметрией ротора**

**АФАНАСЬЕВ А.А.**

Рассмотрен вентильный двигатель с постоянными магнитами, имеющими неодинаковую намагниченность отдельных полюсов ротора. В таком двигателе магнитная индукция в воздушном зазоре имеет кроме основной гармоники и гармоники низшего порядка.

Выполнен анализ индуктивностей взаимной индукции ротора с фазами обмотки статора.

Исследованы рабочие свойства вентильного двигателя с магнитной асимметрией ротора на основе его математической модели в координатах  $d, q$ , у которой ток статора содержит только поперечную составляющую. В этом случае вентильный двигатель имеет максимальный электромагнитный момент при заданном токе. Показано, что даже при 5%-ном недомагничивании магнитов одного полюса ротора появляются значительные пульсации тока и электромагнитного момента двигателя.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический вентильный двигатель, магнитная асимметрия ротора, постоянные магниты, математическая модель, пульсации тока и электромагнитного момента, коэффициент мощности.

A valve motor with permanent magnets having unequal magnetization of the individual poles of the rotor is considered. In such an engine, magnetic induction in the air gap has, in addition to the main harmonic and a lower-order harmonic. The analysis of the inductance of mutual induction of the rotor with the phases of the stator winding is performed. The working properties of a valve motor with magnetic asymmetry of the rotor are investigated on the basis of its mathematical model in coordinates, in which the stator current contains only a transverse component. In this case, the valve motor has a maximum electromagnetic torque at a given current. It is shown that even with a 5% magnetization of the magnets of one pole of the rotor, significant pulsations of the current and electromagnetic torque of the motor appear.

**Key words:** magnetoelectric valve motor, magnetic asymmetry of the rotor, permanent magnets, mathematical model, current and electromagnetic moment pulsations, power factor.

*Электротехника, 2022, №1, стр. 12-16*

### **Измерительный комплекс для регистрации петель гистерезиса ферромагнитных материалов**

ШВЕЦОВ Д.А., ШИШОВ Д.М., ТРОШИН П.А., ИВАНОВ Н.С.

Рассмотрен полуавтоматический измерительный комплекс для получения петель гистерезиса ферромагнитных материалов при различных частотах перемагничивания. Комплекс разработан на базе классического осциллографического метода и позволяет существенно расширить возможности его применения. Представлены результаты экспериментов по исследованию магнитных свойств образцов различных материалов при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$  и температуре кипения жидкого азота ( $-195,75^{\circ}\text{C}$ ). Петли гистерезиса снимались при частотах перемагничивания в 50, 200, 400 и 800 Гц. Полученные результаты демонстрируют существенную температурную зависимость магнитных параметров образцов от температуры и частоты.

**Ключевые слова:** ферромагнитные материалы, намагничивание, петля гистерезиса, измерительный комплекс.

A semi-automatic measuring complex for obtaining hysteresis loops of ferromagnetic materials at various magnetization reversal frequencies is considered. The complex is developed on the basis of the classical oscillographic method and allows you to significantly expand the possibilities of its application. The results of experiments on the study of the magnetic properties of samples of various materials at a temperature of  $+25^{\circ}\text{C}$  and at the boiling point of liquid nitrogen ( $-195,75^{\circ}\text{C}$ ) are presented. Hysteresis loops were removed at the magnetization reversal frequencies of 50, 200, 400 and 800 Hz. The obtained results demonstrate a significant temperature dependence of the magnetic parameters of the samples on temperature and frequency.

**Key words:** ferromagnetic materials, magnetization, hysteresis loop, measuring complex.

*Электротехника, 2022, №1, стр. 17-27*

### **Управление следящим электроприводом при наличии зазора в кинематической передаче высокой степени жесткости**

ТАРАРЫКИН С.В., АПОЛОНСКИЙ В.В.

Выполнен анализ способов компенсации зазора в следящих системах электропривода, реализующих контурно-позиционное управление рабочими органами технологических машин. Выявлены их основные достоинства и недостатки в управлении одноканальными электроприводами, являющиеся причинами недостаточной эффективности при использовании в станкостроении, металлообработке, поточном оборудовании химической, текстильной и других отраслях промышленности. На основе корректного применения метода гармонической линеаризации нелинейностей (метода описывающей функции) выполнен детальный анализ типовой астатической следящей системы электропривода с подчиненным регулированием тока, скорости и положения. Выявлены причины возникновения автоколебаний и ухудшения качества переходных процессов электропривода при наличии зазоров в его механической части. В результате частотного анализа динамики нелинейной системы электропривода разработаны синергетически дополняющие друг друга способы компенсации влияния зазора путем корректировки свойств интегрирующих элементов в главном контуре управления положением при скачкообразных изменениях кинематики. Они реализуются применением ПИ-регулятора положения с переключаемой интегральной частью и введением дополнительной стабилизирующей обратной связи по разности угловых перемещений электродвигателя и рабочего органа на вход регулятора тока. Эффективность результатов теоретических исследований подтверждается детализированным математическим моделированием разработанных систем управления электроприводами, а также натурными экспериментами на многофункциональном экспериментальном стенде.

**Ключевые слова:** одноканальный электропривод, жесткая кинематика, система подчиненного регулирования координат, компенсация влияния зазора, изменение свойств интеграторов, метод гармонического баланса.

The analysis of existing methods of backlash compensation in servo systems of an electric drive with contour-positioning control of the loads of technological machines, was carried out. The main advantages and disadvantages in the control of single-channel electric drives were revealed. Those are the reasons for insufficient efficiency when used in machine-tool building, metalworking, in-line equipment for the chemical, textile, and other industries. The detailed analysis based on the correct application of the describing function of nonlinearities of a typical astatic servo system of an electric drive with cascade control of current, speed and position was carried out. The reasons for the occurrence of self-oscillations and deterioration in the quality of transient processes of an electric drive in the presence of backlash in its mechanical part were

revealed. As a result of the frequency analysis of the dynamics of the nonlinear system of the electric drive, the synergistically complementary methods of compensation for the influence of the backlash by adjusting the properties of the integrating elements in the main loop of position control in case of abrupt changes in kinematics were developed. They are implemented by using a PI position controller with a switchable integral part and introducing additional stabilizing feedback on the difference in angular displacements of the electric motor and the load to the input of the current controller. The effectiveness of the results of theoretical studies is confirmed by detailed mathematical modeling of the developed control systems for electric drives, and field experiments on multifunctional experimental equipment.

**Key words:** single-channel electric drive, stiff kinematic, cascade control system, backlash compensation, change the properties of the integrators, describing function method.

*Электротехника, 2022, №1, стр. 28-35*

### **Программный продукт для повышения эффективности управления электроприводом очистного комбайна**

БАБОКИН Г.И., ШПРЕХЕР Д.М., ЗЕЛЕНКОВ А.В.

Представлен программный продукт, предназначенный для повышения эффективности и автоматизации управленческих решений при эксплуатации очистного угольного комбайна. Назначение продукта – распознавание форм кривых, характеризующих вид внешнего воздействия на электромеханическую систему в виде скачка сопротивляемости угля резанию, а также исследование показателей достоверности и погрешности алгоритма распознавания вида входного воздействия по данным многопараметрического отклика этой системы (броска тока асинхронного двигателя резания и изменения скорости подачи очистного комбайна). Типовые решаемые задачи – графический анализ кривых отклика для эвристического анализа и выбора длины фрагмента, подлежащего распознаванию в зависимости от вариабельности кривых при изменении уровня скачка сопротивляемости угля резанию; генерация обучающей выборки или базы данных шаблонов кривых при различных сочетаниях параметров ПИ-регулятора и уровней ступенчатого воздействия – скачка сопротивляемости угля резанию; однократное распознавание фрагментов кривых с помощью программного модуля; исследование статистических свойств прогнозных моделей в различных условиях функционирования системы. Программный продукт позволяет исследовать помехоустойчивость моделей распознавания и достаточность

интервала наблюдения для получения достоверных прогнозов по скачку сопротивляемости угля резанию. Область применения – системы управления, диагностирования и обработки информации электромеханических объектов, очистные механизированные комплексы.

*Ключевые слова:* электромеханическая система, очистной комбайн. сопротивляемость угля резанию, программный продукт, ПИ-регулятор, нейронная сеть.

A software product designed to improve the efficiency and automation of management decisions during the operation of the shearer in real conditions is presented. Purpose – to recognize the shapes of curves characterizing the type of external influence on the electromechanical system in the form of a jump in the resistance of coal to cutting, as well as to study the reliability and error indicators of the algorithm for recognizing the type of input action according to the multiparameter response of this system (in the sections of the current inrush of the asynchronous cutting motor and changes shearer feed speed). Typical tasks to be solved: graphical analysis of response curves for heuristic analysis and selection of the length of the fragment to be recognized depending on the variability of the curves when the level of the jump in the cutting resistance of coal changes; generation of a training sample or a database of curve templates for various combinations of PI-controller parameters and levels of step action – a jump in coal cutting resistance; single recognition of curve fragments using a software module; study of the statistical properties of predictive models in various conditions of the system functioning. The software product allows you to investigate the issues of noise immunity of recognition models and the sufficiency of the observation interval to obtain reliable forecasts for the jump in coal cutting resistance. Field of application: control systems, diagnostics and information processing of electromechanical objects, cleaning mechanized complexes.

*Key words:* electromechanical system, shearer, coal cutting resistance, software product, PI controller, neural network.

*Электротехника, 2022, №1, стр. 36-40*

**Определение модуля импеданса имитатора солнечной батареи для систем электроснабжения космических аппаратов**

РЕКУТОВ О.Г.

Одной из основных характеристик имитатора солнечной батареи (ИБС), определяющей его соответствие реальной солнечной батарее, является внутренний импеданс, который должен соотноситься с участками его вольт-амперной характеристики следующим образом. Когда ИБС работает на участке тока, он должен представлять собой источник тока, внутренний импеданс которого должен быть много больше импеданса нагрузки; на участке напряжения ИБС должен представлять собой источник напряжения, чей внутренний импеданс должен быть много меньше импеданса нагрузки. Измерение модуля импеданса имитатора позволяет оценить его фактическое соответствие этим требованиям. Измеренные значения модуля гораздо точнее определяют его характеристики по сравнению с расчетными, а также позволяют оценить степень их достоверности и выявить резонансные частоты, на которых зависимости модулей ИБС от частоты изменения нагрузки, соответствующие участкам тока и напряжения, существенно отличаются от расчетных, что обусловлено наличием распределенных параметров активной и реактивной составляющих внутреннего импеданса ИБС. Стандартные методики расчета, основанные на использовании параметров элементов схемы, этого не учитывают. Реальная зависимость модуля импеданса имитатора от частоты изменения нагрузки позволит спрогнозировать поведение каждого элемента системы, располагая его аналогичными параметрами.

**Ключевые слова:** система электропитания космического аппарата, имитатор солнечной батареи, внутренний импеданс энергопреобразующей аппаратуры, резонанс, наземные испытания.

One of the main characteristics of a solar battery simulator (SBS), which determines its compliance with a real solar battery, is the internal impedance, which should correspond to the sections of its volt-ampere characteristic as follows. When the SBS operates in a current section, it must be a current source whose internal impedance must be much greater than the load impedance; in a voltage section, the SBS must be a voltage source whose internal impedance must be much less than the load impedance. Measuring the impedance module of the simulator allows you to assess its actual compliance with these requirements. The measured values of the module determine its characteristics much more accurately compared to the calculated ones, and also allow us to assess the degree of their reliability and identify resonant frequencies at which the dependences of the SBS modules on the frequency of load changes corresponding to current and voltage sections differ significantly from the calculated ones, due to the presence of distributed parameters of the active and reactive components of the SBS internal impedance.

Standard calculation methods based on the use of parameters of circuit elements do not take this into account. The real dependence of the simulator's impedance module on the frequency of load changes will make it possible to predict the behavior of each element of the system, having its similar parameters.

**Key words:** spacecraft power supply system, solar battery simulator, internal impedance of energy-converting equipment, resonance, ground tests.

*Электротехника, 2022, №1, стр. 41-46*

### **Устройство питания измерительных датчиков, расположенных на воздушной линии электропередачи**

СКРИПАЧЁВ М.О., КРОТКОВ Е.А., МАКАРОВ Я.В.

При размещении датчиков измерения физических параметров воздушных линий (ВЛ) электропередачи высокого напряжения непосредственно на высоком потенциале проводника ВЛ необходимо обеспечить бесперебойное питание датчиков. Краткий обзор статей, посвященных устройствам питания датчиков измерения, установленных на проводнике ВЛ, выявил достоинства и недостатки технических решений. Анализ соответствующих технических решений показывает, что способ отбора мощности с помощью трансформатора тока от проводника ВЛ заслуживает дальнейшего изучения. Достоинство такого способа – автономность, недостаток – необходимость стабилизации напряжения на нагрузке в широком диапазоне изменения первичного тока ВЛ. Поэтому актуальной задачей является разработка устройства питания датчика с отбором мощности от проводника ВЛ, обеспечивающего датчик измерения стабильным входным напряжением во всём диапазоне изменения токов в проводнике. Предложены принцип и схема работы устройства питания, на примере которой выполнено физическое и имитационное моделирование. Анализ осциллограмм тока и напряжения лабораторного прототипа устройства питания подтвердил возможность стабилизации уровня напряжения питания датчиков измерения в нормальных и аварийных электрических режимах ВЛ. При включении лабораторного прототипа устройства питания на аварийный первичный ток кривая напряжения имеет апериодический характер со временем установления менее периода промышленной частоты и не достигает опасных значений для электронной части устройства питания. Устройство питания, построенное по предложенному принципу, является достаточно универсальным и может применяться для надёжного питания

датчиков измерения, установленных на проводнике ВЛ.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи высокого напряжения, отбор мощности, устройство питания, датчик измерения.

When placing sensors for measuring the physical parameters of high-voltage overhead transmission lines (overhead lines) directly on the high potential of the overhead line conductor, it is necessary to ensure uninterrupted power supply to the sensors. A brief review of articles on power supply devices for measurement sensors installed on the overhead line conductor revealed the advantages and disadvantages of technical solutions. An analysis of the relevant technical solutions shows that the method of power take-off using a current transformer from the overhead line conductor deserves further study. The advantage of this method is autonomy, the disadvantage is the need to stabilize the voltage on the load in a wide range of changes in the primary current of the overhead line. Therefore, an urgent task is to develop a sensor power supply device with power extraction from the overhead line conductor, providing the measurement sensor with a stable input voltage over the entire range of currents in the conductor. The principle and scheme of operation of the power supply device are proposed, on the example of which physical and simulation modeling is performed. The analysis of the current and voltage waveforms of the laboratory prototype of the power supply device confirmed the possibility of stabilizing the voltage level of the measurement sensors in normal and emergency electrical modes of the overhead line. When the laboratory prototype of the power supply device is switched on to the emergency primary current, the voltage curve has an aperiodic character with a time of establishment less than the period of the industrial frequency and does not reach dangerous values for the electronic part of the power supply device. The power supply device built according to the proposed principle is quite versatile and can be used for reliable power supply of measurement sensors installed on the overhead line conductor.

**Key words:** high voltage overhead power line, power take-off, power supply device, measurement sensor.

*Электротехника, 2022, №1, стр. 47-53*

**Эквивалент энергосистемы глобального энергетического объединения для расчётов динамической устойчивости**

КУЗНЕЦОВ О.Н., ЗУБКОВА И.С., АВЕРЬЯНОВ Д.А.

Расчёт электромеханических переходных процессов и устойчивости сложных электроэнергетических систем большой размерности, несмотря на существенные вычислительные мощности современных компьютеров, является сложной в вычислительном отношении задачей, решение которой требует больших временных затрат, а в ряде случаев, для системы большой размерности эта задача неразрешима. В статье представлен подход к разработке эквивалента глобального энергетического объединения для расчёта динамической устойчивости. Динамический эквивалент электроэнергетической системы большой размерности, полученный с помощью метода эквивалентирования генераторов когерентных групп и эквивалентирования электрической сети позволяет существенно сократить размер решаемой задачи и получить решение с помощью известных программно-вычислительных комплексов. Создание динамического эквивалента глобального энергетического объединения является сложной задачей, для решения которой требуются данные о всех входящих в энергообъединение электроэнергетических системах, собрать которые также трудно разрешимая задача. Для качественной оценки условий устойчивости энергообъединения параметры динамических эквивалентов энергосистем могут быть вычислены по обобщённым показателям энергосистем.

**Ключевые слова:** глобальное энергетическое объединение, динамический эквивалент, когерентные группы генераторов, электромеханические переходные процессы, устойчивость электроэнергетических систем.

The calculation of transients and stability of complex large-dimensional electric power systems, despite the significant computing power of modern computers, is a computationally complex task, the solution of which requires a lot of time, and in some cases, for a large-dimensional system, this problem is unsolvable. The article presents an approach to developing an equivalent of a global energy interconnection for transient stability calculating. The dynamic equivalent of a large-dimensional electric power system obtained using the method of equivalence of generators of coherent groups and equivalence of the electric network makes it possible to significantly reduce the size of the problem being solved and obtain a solution using well-known software. Creating a dynamic equivalent of a global energy interconnection is a complex task, the solution of which requires data from all the electric power systems connected in the energy interconnection, which is also a difficult task to collect. For a qualitative assessment of the stability conditions of the energy interconnection, the parameters of the dynamic equivalents of

power systems can be calculated from the generalized indicators of power systems.

**Key word:** global energy association, dynamic equivalent, coherent groups of generators, electromechanical transients, stability of electric power systems.

*Электротехника, 2022, №1, стр. 54-58*

### **К расчету механических сил и баланса мощности в электромеханическом преобразователе энергии**

ЖУЛОВЯН В.В., МАЛОЗЁМОВ Б.В.ЩУРОВ Н.И.

Предложен метод расчета механических (электромагнитных) сил, возникающих в электромеханическом преобразователе энергии и действующих на контуры токов в магнитном поле или пластины конденсатора в электрическом поле. Преобразования выполнены на основе принципа возможных перемещений с привлечением аппарата частных производных. Установлено, что мощность, преобразуемая в механическую мощность, частично затрачивается на изменение энергии электромагнитного поля, а другая, определяемая коэнергией, преобразуется в механическую мощность. Получены выражения для механических (электромагнитных) сил на основе баланса мощностей. Сравнение полученных результатов с известными данными подтверждает принцип 50/50, означающий, что только часть мощности, связанная с движением контуров, преобразуется в механическую, тогда как другая идет на изменение энергии магнитного поля.

**Ключевые слова:** электромеханическое преобразование энергии, электромагнитное поле, баланс мощностей, механическая сила, энергия, коэнергия.

A method is proposed for calculating mechanical (electromagnetic) forces arising in an electromechanical energy converter and acting on current circuits in a magnetic field or capacitor plates in an electric field. The transformations are performed on the basis of the principle of possible displacements with the involvement of the apparatus of partial derivatives. It is established that the power converted into mechanical power is partially spent on changing the energy of the electromagnetic field, and the other, determined by co-energy, is converted into mechanical power. Expressions for mechanical (electromagnetic) forces based on the power balance are obtained. The comparison of the obtained results with the known data confirms the 50/50 principle, which means that only part of the power associated with the movement of the contours is converted into mechanical power, while the other goes to change the energy of the

magnetic field.

**Key words:** electromechanical energy conversion, electromagnetic field, power balance, mechanical force, energy, co-energy.

*Электротехника, 2022, №1, стр. 58-63*

**Анализ устойчивости жидкометаллической струи, нагруженной осевым током**  
КИРЕЕВ К.В.

Рассмотрен процесс отключения тока в струйных коммутационных аппаратах. Получены выражения, определяющие условия термической и пространственной устойчивости жидкометаллической струи, нагруженной осевым током. Установлено, что определяющее влияние тепловых или электромагнитных процессов на устойчивость жидкометаллической струи зависит от плотности тока. С ростом плотности тока влияние тепловых процессов становится более заметным по сравнению с электромагнитным пережатием. Показано, что использование струйного отключения главных контактов аппарата целесообразно при плотностях тока до 100–150 А/мм<sup>2</sup>. Для увеличения номинальных параметров струйных коммутационных устройств предложено шунтирование размыкающихся главных контактов жидкометаллической струей, что позволит уменьшить объем используемого жидкометаллического рабочего тела, а также усилить эффект токоограничения в процессе коммутации.

**Ключевые слова:** струйные коммутационные аппараты, жидкометаллические контакты, электрическая дуга, устойчивость.

The process of current disconnection in jet switching devices is considered. Expressions defining the conditions of thermal and spatial stability of a liquid-metal jet loaded with an axial current are obtained. It is established that the determining influence of thermal or electromagnetic processes on the stability of a liquid metal jet depends on the current density. As the current density increases, the influence of thermal processes becomes more noticeable compared to electromagnetic compression. It is shown that the use of jet disconnection of the main contacts of the device is advisable at current densities up to 100-150 A/mm<sup>2</sup>. To increase the nominal parameters of jet switching devices, it is proposed to bypass the opening main contacts with a liquid-metal jet, which will reduce the volume of the liquid-metal working fluid used, as well as

enhance the current-limiting effect in the process of mutation.

**Key words:** jet switching devices, liquid metal contacts, electric arc, stability.

*Электротехника, 2022, №1, стр. 64-65*

**Авторы номера**