

## **Эффективность и область рационального применения электропривода для демпфирования колебаний упругих механических передач**

ПЯТИБРАТОВ Г.Я.

Рассмотрены параметрические способы демпфирования колебаний в электромеханических системах (ЭМС) с упругими связями (УС.) Определены условия уменьшения динамических нагрузок и колебаний скорости механизмов благодаря подбору рациональных параметров, способствующих увеличению диссипации энергии упругих колебаний в механической и электрической частях системы. Исследования показали, что в ЭМС с УС уменьшение динамических усилий в упругих передачах с использованием демпфирующих устройств, встраиваемых в механическую часть рабочих машин, часто оказываются труднореализуемыми и малоэффективными, поэтому целесообразно использовать демпфирующие свойства электропривода (ЭП). Выявлены факторы, определяющие максимальные амплитудные значения колебаний в упругих механизмах рабочих машин с ЭП. Обоснованы рациональные параметры силовой части и регуляторов системы управления ЭП, обеспечивающие предельные возможности электропривода по демпфированию колебаний усилий в ЭМС с УС. Установлено, что демпфирование электроприводом колебаний в упругих передачах механизмов, вызванных изменением возмущающего усилия наиболее эффективно, если резонансные частоты ЭМС с УС попадают в полосу частот пропускания электропривода, а соотношение моментов инерции двигателя и механизма, разделённых упругим элементом, находится в пределах от 1 до 5. Определены области рационального применения систем подчинённого регулирования координат ЭП для уменьшения динамических усилий в упругих механических передачах рабочих машин. Для повышения эффективности демпфирования колебаний в ЭМС с УС необходимо с учетом предложенных рекомендаций осуществлять совместное комплексное проектирование механической и электрической части системы. Применение на практике приведенных в статье рекомендаций подтвердило возможность с помощью ЭП уменьшать колебания в упругих механизмах многосекционных стеклоформовочных машин IS-8, сбалансированных манипуляторов МП-100 и технологических аппаратов переработки пластических материалов.

*Ключевые слова:* механические передачи, электропривод, демпфирование колебаний, рациональные параметры

The efficiency of parametrical ways of oscillations damping in electromechanical systems with elastic elements (EMSEE) which are result to decreasing of dynamical loads and velocity oscillations by means of parameters selection, contributing to increasing of elastic oscillation

energy dissipation in mechanical and electrical subsystems is considered and analyzed. The research showed that decreasing of dynamic loads in elastic transmissions of EMSEE by means of damping devices, embedded in mechanical subsystem of electric drive, often are difficult to implement and low effective, that is why expedient to use a damping properties of electric drive. The factors, defining maximum values of oscillations in elastic mechanisms of EMSEE are identified. The rational parameters of power subsystem and correctors of electric drive, providing limit capabilities of electric drive in case of damping of elastic oscillations in EMSEE are substantiated. The fact, that damping by means of electric drive of elastic oscillations in transmissions, caused by changing of disturbance load is effective upon condition that resonant frequencies of EMSEE are situated in bandwidth of electric drive and ratio of inertia of motor and mechanism, separated by elastic element is from 1 up to 5 is identified. The ways of rational implementation of slave control systems of electric drive's coordinates for decreasing of dynamic loads in elastic transmissions are identified. For damping efficiency increasing of elastic oscillations in EMSEE is necessary to make a joint designing of mechanical and electrical subsystems, taking into account recommendations, given in this article. Practical realization of recommendations, given in this article, confirmed a possibility of decreasing of elastic oscillations by means of electric drive in mechanisms of multi-sectional glassforming machines IS-8, balanced manipulators MP-100 and devices for recast of plastic materials.

*Key words:* mechanical transmissions, electric drive, oscillations damping, rational parameters.

### **Сравнительная оценка работы асинхронной машины в условиях минимизации реактивной мощности**

СИМАКОВ Г. М. ФИЛЮШОВ Ю. П.

В работе выполнен сравнительный анализ основных характеристик динамических и энергетических свойств работы асинхронной короткозамкнутой машины при законах управления, обеспечивающих формирование электромагнитного момента в условиях стабилизации потокосцепления ротора и в условиях формирования электромагнитного момента при минимизации реактивной мощности.

*Ключевые слова:* электропривод переменного тока, асинхронная машина, минимизация реактивной мощности, сравнение основных свойств.

In this paper a comparative analysis of the main characteristics of the dynamic and energetic properties of asynchronous short-machine at different controls laws, ensuring the formation of

electromagnetic torque in terms of stabilization rotor flux end in the conditions the formation of the electromagnetic torque while minimizing the reactive power.

*Key words:* electric AC induction machine, minimizing the reactive power, comparison of the basic properties.

### **Моделирование и исследование позиционной системы электропривода с нелинейной коррекцией**

ДЕНИСОВ В.А., МАДЫШЕВ Р.Р.

Рассмотрены принцип построения, структура и синтез параметров позиционной системы электропривода с нелинейной коррекцией, обеспечивающей высокое быстродействие при отработке заданного перемещения. Структура позиционной системы создана на основе типового электропривода с вентильным двигателем и микропроцессорным модулем, в котором программа нелинейной коррекции осуществляет переключение обратных связей в функции ошибки выходной координаты. Дан сравнительный анализ работы позиционной системы с типовой системой электропривода, в которой управление построено по принципу подчиненного регулирования координат.

*Ключевые слова:* позиционная система с нелинейной коррекцией, моделирование системы электропривода с переменной структурой.

The principles of construction, the structure and synthesis of positional parameters of the electric drive system with non-linear correction, which provides high speed at working off of set moving. The structure of the positioning system is based on a typical electric brushless motor with microprocessor module, in which the non-linear correction switches feedback in the error function output coordinates. The comparative analysis of the system with non-linear correction with a typical positional electric drive, control system is built on the principle of subsidiarity control coordinates.

*Key words:* electric positioning system with software correction, modeling of the electric drive system with variable structure.

### **Применение принципа разделения модели гармонического возмущения в структурно-параметрическом синтезе селективно-инвариантных электромеханических систем**

ТАРАРЫКИН С.В., ТИХОМИРОВА И.А., КОПЫЛОВА Л.Г.

Рассмотрена задача улучшения отработки гармонического возмущения момента нагрузки

электродвигателя при одновременном снижении степени сложности регуляторов с учетом дополнительных критериев качества электромеханических систем: помехоустойчивости, чувствительности к вариациям параметров объекта и наличию запаздывания сигналов силового преобразователя. В качестве основного используется принцип селективной инвариантности, предполагающий включение модели возмущения в состав управляющего устройства электропривода. Отличительной особенностью работы является применение двухконтурных структур электромеханических систем с «быстрым» внутренним контуром управления и использование принципа разделения модели возмущения на интегральную и колебательную составляющие с переносом одной из них в состав «быстрой» подсистемы. Разработаны методики расчета параметров регуляторов и выполнены сравнительные исследования синтезируемых электромеханических систем по комплексу основных и дополнительных критериев качества.

*Ключевые слова:* двухконтурная электромеханическая система, компенсация гармонических возмущений, разделение модели возмущения, синтез и структурная оптимизация регуляторов, селективная инвариантность.

The problem of response improvement of harmonic disturbance of electric drive load torque and the problem of simultaneous reduction of complexity degree of control devices are solved. The additional quality factors such as noise stability, sensibility to object parameters variations and sensibility to transport delay of signals in power converter of electromechanical systems are taken into account. Selective invariance principle, which assumes that disturbance model is included into electric drive control device, is used as the main principle. The paper has some distinctive features. The first one is the application of dual circuit structures of electromechanical systems with “rapid” internal control loop. The second one is the application of separation principle of disturbance model into integral and oscillatory components. The third feature is transfer of one of the disturbance model components into “rapid” subsystem. Methods of calculation of control devices parameters are developed. Comparative researches of synthesized electromechanical systems by using the complex of the main and the additional quality factors are implemented.

*Key words:* dual circuit electromechanical system, harmonic disturbance compensation, internal model separation, synthesis and structural optimization of control devices, selective invariance.

### **Линейный синхронный генератор мощностью 30 кВт для волновой энергетики**

АНТИПОВ В.Н., ГРОЗОВ А.Д., ИВАНОВА А.В.

В статье представлены результаты изучения прямого преобразования энергии волн с

помощью плавающего буй-абсорбера и линейного электрического генератора. Рассмотрены конструктивные особенности модульного исполнения синхронного линейного генератора с постоянными магнитами и концентрической обмоткой статора, а также представлен алгоритм выбора его главных размеров. Мощность линейного генератора и его характеристики определены для значимой высоты волны на примере 6-модульной 16-полюсной конструкции генератора СЛГПМ-30-16 мощностью 30 кВт. Методом конечных элементов для различных режимов определены характеристики электромагнитных полей и параметры синхронного генератора.

*Ключевые слова:* преобразование энергии волн, плавающий буй-абсорбер, линейный генератор, постоянные магниты, электромеханические процессы, численный анализ, электромагнитные поля, оптимизация проектирования

This paper presents the results of a preliminary study on the direct wave power conversion by linear electrical generator of a moored floating-point absorber. The design philosophy and program for definition of the module design main dimensions of permanent magnet synchronous linear generator with concentrated winding are represented. The synchronous linear generator average power and performances are associated with the significant wave. This design philosophy is used to create the 6 module 16 pole permanent magnet reciprocating linear electric generator SLGPM-30-16 with rating power 30 kW. The finite element method is implemented to determine the magnetic fields for different operation states and to evaluate some synchronous machine parameters.

*Key words:* wave energy conversion), floating-point absorber, linear generator, permanent magnet, electromechanical processes, numerical analysis, electromagnetic fields, design optimization

## **Обнаружение повреждений воздушных линий электропередачи локационным методом**

МИНУЛЛИН Р.Г.

Обобщен экспериментальный материал по обнаружению обрывов и коротких замыканий на линиях электропередачи, полученный локационным методом в течение многих лет. Рассмотрены особенности локационной диагностики воздушных линий электропередачи с древовидной (6-10 кВ) и линейной (35 кВ и выше) топологией. Описываются методики распознавания рефлектограмм локационного зондирования с указанием вида и места повреждения на линии. Рассмотрены способы выделения отраженных локационных

сигналов среди технологических помех, присутствующих в высокочастотном тракте высоковольтных линий.

*Ключевые слова:* высоковольтные линии электропередачи, короткие замыкания и обрывы проводов, локационное зондирование, методика обнаружения и идентификации повреждений, выделение локационного сигнала среди помех.

Authors sum up and analyze abundant experimental material on detection of breakage and short circuits in electric power lines obtained over the years by location method. The paper presents key elements of location diagnostics of overhead electric power lines with tree-type (6-10 kV) and linear (35 kV and more) topology. A strategy to analyse location probing reflectograms indicating the type and location of line breakage is described. Authors discuss the techniques to extract reflected location signal in a high-frequency path of high-voltage lines.

*Key words:* high-voltage electric power lines, wire breakage and short circuits, location probing, a strategy to detect and identify the line faults, extracting location signal.

## **Исследование алгоритмов работы пятифазного преобразователя в режиме векторной широтно-импульсной модуляции**

ТЕРЁШКИН В.М., ГРИШИН Д.А.

Рассмотрены алгоритмы управления пятифазного преобразователя, работающего на симметричную пятифазную нагрузку. Выполнено теоретическое исследование формирования результирующего вращающегося вектора тока при реализации семи алгоритмов управления. Пространство состояний вращающихся результирующих векторов пятифазного преобразователя состоит из шести последовательностей коммутаций: три последовательности в пять ключей, одна последовательность в четыре ключа, одна последовательность в три ключа и одна последовательность в два ключа. Каждая из данных последовательностей коммутаций может быть использована при формировании симметричного пятифазного напряжения, необходимого для питания пятифазного двигателя. Рассмотрена последовательность коммутаций, которая формирует симметричное во времени напряжение, но не обеспечивает создание кругового вращающегося поля пятифазной обмоткой. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие теоретические исследования.

*Ключевые слова:* пятифазная машина переменного тока, пятифазный преобразователь, симметричное выходное пятифазное напряжение, векторная широтно-импульсная модуляция.

Considered seven five-phase inverter control algorithms running on a five-phase symmetrical load. A theoretical study of the formation of the result of the rotating current vector in the implementation of the seven control algorithms. The state space of five-phase inverter includes rotating the resulting vector of six commutation sequences: the sequence of five three keys in a sequence of four keys, one key sequence in three and one in a sequence of two keys. Each of these switching sequences can be used to form a symmetrical five-phase voltage required for the five-phase motor power supply. The sequence of switching operations which forms a symmetrical voltage at the time, but does not ensure the creation of a circular rotating field five-phase winding. The results of experimental studies, confirming theoretical studies.

*Key words:* five-phase AC machine, five-phase converter, a symmetrical five-phase output voltage, vector pulse-width modulation

### **Сравнение средних по времени потерь мощности в биполярных транзисторах с изолированным затвором и комбинированных сит-моп-транзисторах**

КЮРЕГЯН А.С., ГОРБАТЮК А.В., ИВАНОВ Б.В.

Проведено двумерное численное моделирование процессов переключения эквивалентных кремниевых биполярных транзисторов с изолированным затвором типа CSTBT и комбинированных СИТ-МОП-тиристоров (КСМТ) из блокирующего состояния в проводящее и обратно. Показано, что при включении и выключении энергия коммутационных потерь в тиристоре КСМТ больше, чем в полностью эквивалентном тиристоре CSTBT, поэтому средняя по времени мощность  $\bar{P}$ , рассеиваемая в тиристоре КСМТ, становится меньше, чем в эквивалентном тиристоре CSTBT только при большой длительности импульса тока. Однако уменьшение времени жизни  $\tau_0$  неравновесных носителей заряда в СИТ позволяет существенно снизить коммутационные потери тиристора КСМТ, сохраняя его преимущество в открытом состоянии. Вследствие этого для каждого набора параметров тиристора CSTBT можно подобрать такое  $\tau_0$  в «почти эквивалентном» тиристоре КСМТ, что мощность  $\bar{P}$ , рассеиваемая в тиристоре КСМТ, будет меньше, чем в эквивалентном тиристоре CSTBT в любом заданном диапазоне значений амплитуды  $J_a$  и длительности  $T_{ON}$  импульсов тока.

*Ключевые слова:* биполярные транзисторы с изолированным затвором, тиристоры с электростатическим управлением, статические и коммутационные характеристики, средняя мощность потерь, сравнительный анализ.

Two-dimensional numerical simulation of switching processes of equivalent silicon insulated gate bipolar transistors type CSTBT and hybrid SIT-MOS thyristors (HSMT) has been performed. It is shown that the energy of switching losses at turn on and turn off in HSMT is more than in fully equivalent CSTBT. Therefore, the average power  $\bar{P}$  dissipated in XMT is smaller than in equivalent CSTBT only at long current pulse duration  $T_{ON}$ . However, reducing the lifetime of nonequilibrium charge carriers  $\tau_0$  in the SITh can significantly reduce switching loss of HSMT, while maintaining its advantage in on state. Therefore, for each set of CSTBT parameters it is possible to pick up such  $\tau_0$  in "almost equivalent" HSMT that the average power dissipation in HSMT will be less, than in equivalent CSTBT, in any set ranges of current pulse amplitude and duration.

*Key words:* insulated gate bipolar transistors, static induction thyristors, static and switching characteristics, average power losses, comparative analysis.

### **Параметры математической модели электровоза переменного тока**

СЕРЕБРЯКОВ А.С., ГЕРМАН Л.А., ДУЛЕПОВ Д.Е., МАКСИМОВА А.А.

Рассмотрена математическая модель тяговой нагрузки, в основе которой принята нагрузка электровоза со схемой замещения из последовательно соединенных реактора и нелинейного резистора. Предложено вид аппроксимирующего выражения для нелинейного резистора и его параметры определять с использованием экспериментальных осциллограмм и аналитических выражений для цифровой модели электровоза. Показано что математическая модель тяговой нагрузки системы электроснабжения переменного тока, аппроксимирующее выражение для сопротивления нелинейного резистора этой модели и методика определения его коэффициентов позволяют наиболее точно отображать стационарные и нестационарные процессы в тяговой сети переменного тока с учетом тяговой нагрузки. Предложенная математическая модель электровоза переменного тока позволяет рассчитывать установившиеся и переходные электромагнитные процессы в тяговой сети с учетом реальной специфической тяговой нагрузки, которую создают электровозы, питающиеся от контактной сети.

*Ключевые слова:* электровоз переменного тока, тяговая нагрузка, тяговое электроснабжение, математическая модель.



The article discusses the mathematical model of traction load, which adopted the load of the locomotive with the equivalent circuit of series-connected reactor and a nonlinear resistor. The proposed approximate expressions for the nonlinear resistor and its parameters are defined by using experimentally captured waveforms and analytical expressions for a digital model of an electric locomotive. The effect of the magnitude of the loading coefficients in dependence of a current is suggested. It is shown that the mathematical model of traction load of the power supply system of AC, approximating the expression for the resistance of the nonlinear resistor of this model and method of determining its coefficients permit to display stationary and non-stationary processes in traction network of alternating current with the given traction load. A mathematical model of an electric AC allows to calculate steady-state and transient electromagnetic processes in AC traction network based on the real specific traction load, which is created by electric, powered by a contact network.

*Key words:* locomotive ac, the traction load, traction power supply, mathematical model.

### **Использование управляемых электропередач с регулируемой продольной компенсацией для реализации адаптивных сетей**

ГОЛОВ В.П., МАРТИРОСЯН А.А., МОСКВИН И.А., КОРМИЛИЦЫН Д.Н.

Одно из направлений развития управляемых электропередач – применение регулируемых устройств продольной ёмкостной компенсации (УПК). Рассмотрено влияние регулируемых УПК на режимы и устойчивость электроэнергетической системы с двумя генераторными станциями. При исследовании использовались методы математического моделирования, численного интегрирования, метод D-разбиения, вычислительный эксперимент. Показано, что регулируемые УПК позволяют увеличить пропускную способность ЛЭП, оказывают положительное влияние на запас системы по статической апериодической и динамической устойчивости и не приводят к нарушению устойчивости при компенсации, характерной для режимов эксплуатации ЭЭС. Предложена методика определения диапазона изменения параметра регулируемого УПК с целью выбора его оптимального значения, позволяющего, с одной стороны, оказывать максимально положительный эффект на пропускную способность, статическую апериодическую и динамическую устойчивость, с другой стороны – не допускать колебательного нарушения устойчивости. Показана принципиальная возможность построения адаптивных сетей на базе регулируемых УПК. Построение активно-адаптивной сети с использованием регулируемых УПК ведет к созданию высокоинтегрированных интеллектуальных электрических сетей нового поколения, отличающихся увеличенной пропускной

способностью линий электропередачи и увеличенными запасами по статической и динамической устойчивости.

*Ключевые слова:* электроэнергетические системы, регулируемые устройства продольной компенсации, активно-адаптивные сети, устойчивость.

The usage of controlled series compensation devices is one of the tendencies of controlled power transmission lines development. It's necessary to investigate their impact on modes and stability of the electric power system. The study deals with the influence of the controlled series compensation devices on regimes and the stability of the system consisting of two generating stations. To resolve this issue mathematical modeling, numerical integration, D-decomposition method and computational experiment were used. The article shows that controlled series compensation device enhances transmission line capacity, biases for the better static and dynamic stability margins, doesn't lead to oscillatory instability with used in practice compensation factor. In order to determine the series capacitor control parameters range for ensuring the positive effect of such devices on the electrical power system on the one hand and not leading to oscillatory instability on the other hand special method is proposed. The principal possibility of constructing smart grid networks based on controlled series compensation devices is shown. Construction of smart grid network with the usage of controlled series compensation devices leads to the creation of highly intelligent electricity networks of the new generation, which have increased capacity of transmission lines and increased static and dynamic stability margins.

*Key words:* electrical power system, controlled series compensation devices, Smart Grid, stability.

### **Физическая модель индукционного нагревателя для криогенных регулирующих аппаратов**

РУБЦОВ В.П., ЩЕРБАКОВ А.В., РУБЦОВ М.В., ЗУБАРЕВ М.С.

Предложена физическая модель индукционного электрического нагревателя криогенных регулирующих аппаратов. Обоснован выбранный метод исследования. Приведена схема модели, состав измерительного оборудования и методика исследования, на основе которых определены энергетические характеристики индукционного нагревателя и даны рекомендации по его проектированию. Показано, что в качестве базового элемента в предлагаемой модели целесообразно использовать трехстержневую конструкцию

шихтованного магнитопровода с обмоткой, расположенной на среднем стержне. Такая конструкция индукционного нагревателя позволяет проводить исследования с варьированием материала и формы нагреваемого объекта. Обосновано применение микропроцессорного измерительного комплекса, позволяющего контролировать и записывать в память компьютера до шести электрических сигналов с погрешностью не более 2%.

*Ключевые слова:* криогенные аппараты, электрический обогрев, физическая модель индукционного электрического нагревателя, схема замещения, микропроцессорная система измерения, электрические характеристики.

A physical model of the induction electric heater for cryogenic regulating devices is developed. The chosen method of research is proved. The scheme of the physical model, the composition of the measuring equipment and research methods, which are determined on the basis of the energy characteristics of the induction heater, and provides recommendations for its design are given. It is shown that as a basic element in the proposed model is advisable to use the three-core blended magnetic coil disposed in the middle of the core. Such a construction of the induction heater allows to carry out the research, varying the material and shape of the heated object. The application of microprocessor measuring complex, which allows to monitor and record to the computer's memory up to 6 electrical signals with an accuracy of 2% is proved.

*Key words:* cryogenic devices, electric heating, the physical model of the induction electric heater, equivalent circuit, microprocessor system for measuring the electrical characteristics.

### **Комплексный дистанционный контроль высоковольтных изоляторов, находящихся под рабочим напряжением**

ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В., ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ В.А., ХУСНУТДИНОВ Р.А.,  
МАРДАНОВ Г.Д.

Предложен и апробирован метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов на главной понизительной подстанции (ГПП), основанный на одновременной регистрации частичных разрядов ультразвуковым и тепловизионным методами.

*Ключевые слова:* частичные разряды, ультразвуковой метод, тепловизионный метод, высоковольтные изоляционные элементы.

The proposed and tested method of remote condition monitoring of high-voltage insulators on the main step-down substation (MSDS), based on the simultaneous recording of PD ultrasound

and thermal imaging methods.

*Key words:* partial discharge, ultrasonic method, thermal method, high-voltage insulating elements.

### **Моделирование трёхмерного нестационарного температурного поля в нагревательном элементе трансформаторного типа**

ЛЕВИН М.М., СЕРИКОВ А.В.

В работе представлена математическая формулировка задачи моделирования трёхмерного нестационарного температурного поля в нагревательном элементе трансформаторного типа. Обоснована актуальность проводимых исследований. Приведено описание конструкции исследуемого трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой, математическое описание физических процессов и допущения, применяемые при моделировании. Поставленная задача решена с помощью программы ANSYS. Приведены количественные параметры созданной модели. Результаты моделирования представлены в виде температурного поля для различных моментов времени в процессе нагрева исследуемого устройств. Получены график скорости изменения температуры в первичной обмотке и график изменения максимальной температуры в первичной обмотке. Выявлены факторы, приводящие к неравномерному использованию материалов и повышенному старению изоляции нагревательного элемента. Предложены рекомендации по дальнейшему совершенствованию конструкции с целью уменьшения термодинамических нагрузок на изоляцию и увеличения эффективности использования материалов.

*Ключевые слова:* нагревательный элемент трансформаторного типа, нестационарное температурное поле, нагрев, термодинамическая нагрузка, электрическая изоляция.

Mathematical formulation of the problem of unsteady state three-dimensional temperature field simulation in the heating element of a transformer type is presented. Relevance of conducted research is justified. The design description of the heating element of a transformer type is shown. The mathematical description of physical processes simulated in work, and assumptions used in the simulation are shown. The description of the software used in the modeling, and quantitative parameters of the created model are shown. The results of simulation are presented: visualization of the temperature field in the object at different times during the heating process of the studied element; the diagram of maximum temperature in the primary winding and maximum rate of temperature change in the primary winding. The factors leading to uneven use of materials and increased aging of the heating element insulation are revealed. The

recommendations for further improvement of the design in order to reduce thermodynamic stress on the insulation and increase efficiency of materials are offered.

*Key words:* heating element of a transformer type, unsteady state temperature field, heating, thermodynamic stress, electrical insulation.