

*Электричество, 2015, № 11, с. 4–11.*

Анализ электромагнитных процессов в фазоповоротном устройстве с тиристорным управлением

СТЕЛЬМАКОВ В.Н., ТАРАСОВ А.Н.

Одним из эффективных способов повышения устойчивости и надежности электроэнергетических систем (ЭЭС), повышения пропускной способности электрических сетей является создание управляемых (гибких) систем электропередачи переменного тока (FACTS), в том числе применение фазоповоротных устройств (ФПУ) с тиристорным управлением. Такие устройства позволяют осуществлять регулирование потоков мощности в темпе электромагнитных и электромеханических процессов в ЭЭС, что обеспечивает быстроедействие управления потоками мощности. Быстроедействие управляющих устройств является одним из основных требований для межсистемных связей ЭЭС. Выполнен анализ электромагнитных процессов в ФПУ с тиристорным управлением, которое предназначено для непрерывного регулирования перетоков мощности в электрических сетях с параметрической и режимной неоднородностью. Регулирование перетоков мощности осуществляется за счет фазового сдвига выходного напряжения ФПУ высоковольтными тиристорными ключами. Разработана математическая модель ФПУ с тиристорным управлением, включенного в двухмашинную ЭЭС. Анализ электромагнитных процессов в ФПУ выполнен с помощью разработанной математической модели. Получены выражения для вольтодобавочного напряжения и токов, протекающих в серийном и шунтовом трансформаторах при регулировании продольно – поперечным способом. Определен характер и получены значения для мощностей, циркулирующих в схеме ФПУ в установившихся режимах работы системы. *Ключевые слова:* электроэнергетическая система, фазоповоротное устройство, тиристорное управление, вольтодобавочное напряжение, фазовый сдвиг, шунтовой трансформатор, серийный трансформатор, переток мощности

Creation of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) and usage of Phase Shifting Transformers (PST) with thyristor control is one of the effective ways to improve stability and supply security of electric power systems (EPS) and to rise capacity of electric networks. These devices allow to regulate power flows at the pace of electromagnetic and electromechanical processes in EPS which provides effectiveness of power flows control. Fast response of control devices is one of the basic requirements for interconnections EPS. The article considers the analysis of electromagnetic processes in the PST with thyristor control, which is designed for continuous control of power flow in electrical networks with parametric regime and heterogeneity. Regulation of power flows is accomplished by the phase shift of the output voltage with high voltage thyristor switches. Mathematical model of PST with thyristor control included in a two\_machine EPS is developed. Analysis of electromagnetic processes in the PST was considered using this mathematical model. Expressions are obtained for the boost voltage and currents flowing in series and shunt transformers adjusted by longitudinal – transverse method. The character and values are derived for the capacities circulating in the PST Set System. *Key words:* electric power system, phase shifting transformer, thyristor control, booster voltage, phase shift, shunt transformer, series transformer, power flow

*Электричество, 2015, № 11, с. 12–17.*

Системы мониторинга, управления, защиты и диагностики распределительных сетей1  
ШУЛЬГА Р.Н., ШУЛЬГА А.Р., КОВАЛЕВ Д.И., ВИНУКUROV В.Н., КОШЕЛЕВ М.А.

Выполнен анализ систем мониторинга, контроля и управления распределительными энергосистемами по направлениям динамического рейтинга пропускной способности, систем векторных измерений, облачной информационной технологии, баз данных и устройств FACTS для повышения управляемости и устойчивости. В части динамического рейтинга пропускной способности используются многочисленные датчики тока, напряжения, метеоусловий, тензо- и температуры проводов и другие, которые с использованием терминалов на опорах и на подстанции, а также беспроводной связи осуществляют контроль для управления потоками мощности в сети, не допуская ложного отключения потребителей. Анализируется опыт разработок и эксплуатации интегрированных систем мониторинга зарубежных и отечественных производителей. В части применения синхронных векторных измерений напряжений и токов используются датчики углов фазных напряжений, которые позволяют повысить пропускную способность линий, не допуская нарушения устойчивости энергосистемы. В связи с недостаточной управляемостью и устойчивостью существующих распределительных систем предлагается их структурная схема с сочетанием устройств FACTS, датчиков метеоданных, систем динамического рейтинга пропускной способности, векторных измерений, формирования энергоинформационных сетей на базе облачной информационной технологии в реальном масштабе времени.

*Ключевые слова:* распределительная энергосистема, пропускная способность, система мониторинга, векторное измерение, облачная информационная технология, база данных

The analysis systems of monitoring, control and management of the distribution power systems in the areas: dynamic load rating, vector measurements, cloud information technology, databases and FACTS devices to enhance controllability and stability. Regarding a dynamic load rating numerous sensors of current, tension, meteoconditions, tenzo- and temperatures of wires, etc. which with use of terminals on support and on substation, and also a wireless communication control power streams in a network are used, without allowing shutdown of consumers. Experience of development and operation of the integrated systems for monitoring foreign and domestic producers is analyzed. As part of the application of synchronous vector measurements of voltage and current sensors of angles of phase voltages are used, which allow to increase the capacity of lines, avoiding violations of power system stability. Due to the insufficient controllability and stability of existing distributive systems their block diagram with a combination of FACTS devices, sensors of meteodata, systems of a dynamic load rating, vector measurements, formations of power information networks on the basis of cloudy information technology in real time is offered.

*Key words:* distribution power system, load, system of monitoring, vector measurement, cloud information technology, database

*Электричество, 2015, № 11, с. 18–26.*

Определение параметров режима плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи

ЗАСЫПКИН А.С., САЦУК Е.И., ЩУРОВ А.Н.

Рассматривается состав и способы использования разработанного авторами учебно-методического пособия. Приведённые в пособии расчётные таблицы для определения параметров режима плавки гололёда могут использоваться как при проектировании схем плавки гололёда на воздушных линиях электропередачи, так и при их эксплуатации в осенне-зимний период. В качестве аргументов в таблицах используются дискретные

значения температуры воздуха, скорости ветра при гололёде, направление ветра (вдоль или поперёк провода), толщина стенки гололёда плотностью 0,9 г/см<sup>3</sup>. Использование таблиц основано на линейной интерполяции (как в Правилах устройства электроустановок) и без ЭВМ позволяет получить приемлемые по точности результаты: максимально допустимый ток, ток профилактического подогрева, ток 40-минутной плавки, время плавки гололёда, расход электроэнергии. Предложен интегральный показатель эффективности схем плавки гололёда, который позволяет объективно анализировать различные схемы и выбирать лучшие технические решения.

*Ключевые слова:* плавка гололёда, параметры режима плавки, расчётные таблицы, линейная интерполяция

In article the structure and ways of use of the educational and methodical grant developed by authors is considered. The calculation tables provided in a grant for determination of parameters of the regime of ice melting can be used as at design of schemes of ice melting on overhead power lines, and at their operation during the autumn and winter period. As arguments in tables are used discrete values of air temperature, wind speed at ice, the direction of a wind (along or across a wire), thickness of a wall of ice with a density of 0,9 g/cm<sup>3</sup>. Use of tables is based on linear interpolation (as in Electrical Installations Code) and without computer allows to receive the results acceptable on accuracy: the maximum admissible current, current of preventive heating, current of 40-minute melting, ice melting time, electric power expense. The integrated indicator of efficiency of schemes of ice melting which allows to analyze objectively various schemes and to choose the best technical solutions is offered.

*Key words:* ice melting, ice melting regime parameters, calculation tables, linear interpolation

*Электричество, 2015, № 11, с. 26–32.*

Технология безопасного проведения электродинамических испытаний силовых трансформаторов

КУВШИНОВ А.А., ХРЕННИКОВ А.Ю.

Предложен критерий безопасности электродинамических испытаний, который заключается в принудительном прекращении опыта короткого замыкания сразу после формирования сигнала аварийного состояния обмоток испытуемого силового трансформатора. Показано, что практическая реализация предложенного критерия возможна только с использованием высоковольтного сильноточного полупроводникового ключа (ВСПК) на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах. Рассмотрена схема испытательного стенда с защитой от перенапряжений как испытуемого силового трансформатора, так и ВСПК при аварийном прерывании тока короткого замыкания. Определены требования к пропускной способности ограничителей перенапряжений.

*Ключевые слова:* силовой трансформатор, электродинамические испытания, высоковольтный полупроводниковый ключ

The criterion of safety of electrodynamic tests is proposed. It consists in the forced curtailment of short-circuit test immediately after shaping of the signal of the emergency state of the windings of the tested power transformer. It is shown that the practical realization of the criterion proposed is possible only with the use of a high-voltage power current semiconductor

key (HVSPK) on the completely controlled power semiconductor devices. It is examined the circuit of Short-circuit Power Laboratory with surge protection both the tested power transformer and HVSPK during the emergency interruption of short-circuit current. Definite requirements for the capacity and spacing ability of the overvoltage limiters.  
*Key words:* power transformer, electrodynamic tests, high-voltage semiconductor key

*Электричество, 2015, № 11, с. 33–40.*

Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов.

Ч.1. Условия возникновения и защитные мероприятия

ЛАРИН В.С.

Рассмотрены условия возникновения и основные особенности резонансных перенапряжений в различных типах обмоток трансформаторов, а также типовые электрические схемы энергообъектов и коммутации, потенциально опасные в связи с резонансными перенапряжениями. Приведен практический пример, иллюстрирующий одну из потенциально опасных схем и напряжения, воздействующие на трансформатор. Рассмотрены и описаны возможные мероприятия по защите от резонансных перенапряжений обмоток трансформаторов, вызываемых взаимодействием с электрической сетью.

*Ключевые слова:* трансформаторы, резонансные перенапряжения, обмотки, колебания обмоток, защита от перенапряжений

This paper reviews the conditions of appearance and main features of the resonant overvoltages in different types of transformer windings, as well as typical electrical schemes and switching having potential danger in connection with the resonant overvoltages. Practical example is presented which shows one potentially dangerous scheme and voltages affecting the transformer. Paper reviews and describes the measures for protection of windings of transformers against resonance overvoltages caused by the interaction with the electrical network.

*Key words:* transformers, resonance overvoltages, windings, vibration, overvoltage protection

*Электричество, 2015, № 11, с. 41–49.*

Тепловые потоки в токовводах, содержащих высокотемпературные сверхпроводники  
БУЯНОВ Ю.Л.

Предложен приближенный аналитический метод решения и получены математические зависимости, определяющие тепловые потоки в неохлаждаемых с боковой поверхности ВТС токовводах, при разных значениях сопротивления резистивного проводника и контактного сопротивления в месте перехода тока из резистивного проводника в сверхпроводник. Выявлено соотношение между теплом, генерированным в контакте, и теплом, поступающим по резистивной секции в контакт, при разных длинах контактного соединения. Определено влияние температуры охлаждения токоввода на оптимальную плотность тока и удельный теплоприток к источнику охлаждения при разных отношениях сопротивления резистивного проводника и переходного сопротивления.

*Ключевые слова:* высокотемпературные сверхпроводящие токовводы, расчет, оптимизация криогенных токовводов, контактное сопротивление

An approximate analytic solution method is proposed, and mathematical dependences are obtained for determining the heat fluxes in high-temperature superconducting current inlets that are not cooled on their lateral surface at different values of resistive conductor resistance and contact resistance at the place in which the current transfers from the resistive conductor to the superconductor. A correlation is revealed between the heat generated in the contact and the heat entering to the contact via the resistive segment at different lengths of the contact connection. The effect the current inlet cooling temperature has on the optimal current density and the specific heat flux to the cooling source at different ratios between the resistive conductor resistance and transitive resistance.

*Key words:* high-temperature superconducting current inlets, calculation, optimization of cryogenic current inlets, contact resistance

*Электричество, 2015, № 11, с. 50–56.*

Влияние источника первичного магнитного поля транспортной установки на характеристики электродинамического подвеса  
ВОЕВОДСКИЙ К.Э., СТРЕПЕТОВ В.М.

Решена задача электродинамического подвешивания (ЭДП) для случая произвольного (в том числе неравномерного) движения электромагнита относительно бесконечно широкого однородного проводящего полотна конечной толщины. Установлено, что продолжительность протекания переходных процессов, вызванных неравномерностью движения в системе ЭДП, характеризуется бесконечным набором постоянных времени. Получены формулы для их точного расчета, а также приближенных оценок. Можно считать установленным, что в широком диапазоне параметров, характерном для пассажирского варианта ЭДП, использовавшееся в предшествующих работах приближение постоянной скорости (стационарное приближение) дает вполне удовлетворительную точность. В то же время для ряда специальных приложений, допускающих более высокую неравномерность движения, влияние неравномерности оказывается значительным. Диапазон ускорений, в котором применимо стационарное приближение, зависит от геометрии системы и проводимости материала полотна.

*Ключевые слова:* транспортная установка, электродинамический подвес, переходные процессы, левитация, тяга, пусковые и тормозные характеристики

The electrodynamic suspension (EDS) problem is solved for the case of arbitrary (also nonuniform) motion of the electromagnet with respect to a relatively infinitely wide uniform conducting bed with a finite thickness. It has been found that the duration of transients caused by motion nonuniformity in the EDS system is characterized by an infinite set of time constants. Formulas for their exact calculation and for approximate estimates are obtained. It can be regarded as an established fact that in a wide range of parameters typical for the passenger EDS version the constant speed approximation that was used in the previous works (the steady approximation) yields quite satisfactory accuracy. At the same time, for a number of special applications that allow for a higher motion nonuniformity the effect of nonuniformity is quite significant. The range of accelerations in which the steady approximation is applicable depends on the system geometry and conductivity of bed material.

*Key words:* transport plant, electrodynamic suspension, transients, levitation, thrust, starting and braking characteristics

*Электричество, 2015, № 11, с. 57–62.*

Преобразование гармонических напряжений синхронного тахогенератора в постоянное напряжение методом квадратичного умножения  
ИВАНОВ Е.С., ПЯТКОВ М.И.

Предлагается метод преобразования выходных фазных напряжений синхронного тахогенератора в напряжение постоянного тока, пропорциональное частоте вращения вала тахогенератора, не имеющее методических погрешностей, зависящих от частоты вращения (пульсаций). Для реализации предложенного метода требуется наличие на одном валу с тахогенератором цифрового датчика угла поворота контролируемого вала. Линейный параллельный код угла цифрового датчика преобразуется в коды гармонических функций, которые в цифроаналоговом устройстве умножаются на фазные напряжения тахогенератора.

*Ключевые слова:* тахогенератор, частота вращения, пульсации, цифровой датчик угла, цифроаналоговое умножение

A method is proposed for converting the output phase voltages of a synchronous tachogenerator into a DC voltage proportional to the tachogenerator shaft rotation frequency that does not contain methodical errors depending on the rotation frequency (pulsations). For implementing the proposed method it is necessary to have a digital sensor for measuring the monitored shaft's rotation angle installed on the same shaft with the tachogenerator. The linear parallel code of the digital sensor angle is converted into the codes of harmonic functions, which are multiplied in a digital-analog device by the tachogenerator phase voltages.

*Key words:* tachogenerator, rotation frequency, pulsations, digital angle sensor, digital-analog Multiplication

*Электричество, 2015, № 11, с. 63–66.*

Аналитическое решение задачи электростатики для неоднородно деформированного сферического конденсатора  
ПОЛЯКОВ П.А., РУСАКОВА Н.Е., САМУХИНА Ю.В.

Найдена новая форма неоднородного трехмерного конденсатора, допускающая аналитическое решение основной задачи электростатики. Получено аналитическое выражение для распределения поверхностной плотности заряда. Исследована зависимость этой плотности от расстояния между обкладками конденсатора. Показано, что плотность заряда для внутренней фигуры будет иметь максимальное значение в области с минимальным расстоянием между обкладками. Приведена также картина эквипотенциальных поверхностей в конденсаторе.

*Ключевые слова:* неоднородный трёхмерный конденсатор, проводящая оболочка, распределение плотности заряда, аналитическое решение

In the paper new form of nonuniform threedimensional capacitor that enables an exact analytical solution of the electrostatic problem is computed. Hitherto only few analytical solutions of electrostatic problems are known for single geometric forms of capacitors. An analytical solution for the surface charge density distribution is obtained. The dependence of the density on a spacing between the capacitor arms is derived. Its maximum is shown to be at the region where the spacing between the capacitor plates is minimum. The analytical solution

derived in the paper can be used as a test for efficiency of numerical solutions of electrostatics problem by means of different software packages. A plot of the equipotential surfaces is also represented in the work.

*Key words:* inhomogeneous threedimensional capacitor, nonuniform threedimensional capacitor, conducting shell, charge density distribution, analytical solution

*Электричество, 2015, № 11, с. 67–70.*

Оценка надежности системы оперативной блокировки безопасности с программной логикой<sup>1</sup>

БОРИСОВ Р.К., КОКОРИНС.А., КОЧУРОВ О.М., ЧЕРНОКОЗ А.Я.

Проанализировано современное состояние блокировок на подстанциях 6–750 кВ. Показано, что обследования выявляют многочисленные неисправности блокировок. Приводится расчет надежности для новой системы блокировок с микропроцессорным управлением и беспроводной связью между ее компонентами. Расчет подтверждает, что надежность новой системы значительно превосходит надежность существующих.

*Ключевые слова:* электрическая подстанция, оперативная блокировка, надежность, вероятность безотказной работы

The current condition of the lockout at 6–750 kV substations is discussed. It has been shown that surveys reveal numerous lockout faults. The calculation for the reliability of new lockout system with microprocessor control and wireless communication between its components is given. The calculation confirms that the reliability of new system is much superior to the reliability of the existing ones.

*Key words:* electrical substation, safety lockout, reliability, survival function

Памяти Дмитрия Павловича Ледянкина  
(К 100-летию со дня рождения)

Рыбаков Леонид Максимович  
(К 80-летию со дня рождения)