

**Экспериментальное исследование высокочастотных импульсных перенапряжений**

БОРИСОВ Р.К., СМИРНОВ М.Н., ГОЛДУН А.В., ТИХОНОВ Ю.В.

Переходные процессы в сетях высокого и среднего напряжения при коммутациях и коротких замыканиях сопровождаются высокочастотными импульсными перенапряжениями. Необходимо знать их амплитудно-частотные характеристики, чтобы правильно выбрать защитные устройства. Достоверные данные по таким характеристикам можно получить только экспериментальным путем. В статье приведены результаты экспериментальных исследований импульсных перенапряжений в распределительных устройствах (6–500) кВ. Для измерений импульсных перенапряжений применен регистратор с бесконтактными емкостными датчиками. Эксперименты на реальных энергообъектах показали, что наибольшую опасность представляют резонансные явления на высокой частоте. В этом случае уровень перенапряжений может более чем в десять раз превышать амплитудное значение рабочего напряжения. Показано, что при обычной петле присоединения в несколько метров ограничители перенапряжений не обеспечивают защиту оборудования. Необходимо применять RC-цепочки.

Ключевые слова: *импульсные высокочастотные перенапряжения, экспериментальные исследования, устройства защиты.*

Transients in high voltage and medium voltage power supply network due to switching operations and short circuits are accompanied by high frequency impulse overvoltages. Their amplitude and frequency characteristics are necessary to select proper protection devices. Only experimental study can give us reliable data on such characteristics. The paper presents impulse overvoltage experimental study data in switchgears of 6-500 kV. Impulse overvoltages were measured by means of recorder with contactless capacitive sensors. Experimental studies at power engineering facilities showed that most hazardous phenomena are high frequency resonances. In this case, overvoltage was possible to reach more than 10 times higher value than nominal voltage amplitude. Usual method of connection protection device to mains via several meter conductor was shown to be inadequate to provide equipment protection. RC circuits are suited for this situation.

**Key words:** impulse high frequency overvoltages, experimantal study, protection devices.

**Развитие систем изоляции применительно к высоковольтным токопроводам с твердой изоляцией**

КОВАЛЕВ Д.И., ВАРИВодОВ В.Н., ГОЛУБЕВ Д.В., МИРЗАБЕКЯН Г.З.

Приведены результаты исследований по созданию инновационных токопроводов на напряжение 6–110 кВ на основе новых композиционных материалов со встроенными цифровыми элементами диагностики и мониторинга. Рассмотрено применение различных видов компаундов для изготовления изоляционных систем. Акцентируется внимание на особенностях конструкции высоковольтных токопроводов, а также их изоляционных систем. Показано, что основной литой изоляцией высоковольтных токопроводов в настоящее время являются эпоксидные компаунды, в том числе в композиции с другими материалами. Определены основные преимущества литой изоляции высоковольтных токопроводов перед другими видами изоляции. Установлены основные направления развития изоляционных систем токопроводов. Обоснованы ключевые факторы обеспечения электрической прочности и тепловых режимов работы изоляционных систем.

**Ключевые слова:** система изоляции, токопровод, литая полимерная изоляция, электрическая прочность.

The results of research on the creation of innovative 6–110 kV current lines based on new composite materials with built-in digital diagnostic and monitoring elements are presented. The use of various types of compounds for the manufacture of insulation systems is considered. Attention is focused on the design features of high-voltage current pipelines, as well as their insulation systems. It is shown that the main cast insulation of high-voltage current pipelines is currently epoxy compounds, including in the composition with other materials. The main advantages of cast insulation of high-voltage current lines over other types of insulation are determined. The main directions of development of insulating systems of current pipelines are established. The key factors of ensuring the electrical strength and thermal modes of operation of insulation systems are justified.

**Key words:** insulation system, current line, cast polymer insulation, electrical strength.

**Спектральные характеристики электромагнитного излучения облачных разрядов, инициируемых модельными гидрометеорами в искусственном грозовом облаке**

ТЕМНИКОВ А.Г., БЕЛОВА О.С., ЧЕРНЕНСКИЙ Л.Л., ОРЛОВ А.В., ЛЫСОВ Н.Ю., КИВШАР Т.К., КОВАЛЕВ Д.И., ЖУРАВКОВА Д.С., ШМЕЛЁВ А.Я., КОРСАВАВИЛОВА Е.В., ВОЕВОДИН В.В.

На основе вейвлетного анализа представлены спектральные характеристики электромагнитного излучения облачных разрядов, инициируемых группами модельных гидрометеоров в искусственном грозовом облаке. Установлено, что эти характеристики зависят от расположения ячеек разной полярности относительно земли, от места расположения групп крупных гидрометеоров в облаке и способа их объединения в общий массив. Определены характерные частотные диапазоны в спектре электромагнитного излучения облачных разрядов, регистрируемого на поверхности земли и на высоте расположения искусственного грозового облака. Сделано предположение, что массивы крупных градин по разному будут модифицировать характеристики спектра электромагнитного излучения облачных разрядов в грозовом облаке в зависимости от передвижения этих градовых массивов вблизи областей положительного и отрицательного заряда грозового облака. Установлено, что предельные частоты в спектре сигналов, которые регистрировались на поверхности земли, могли достигать 400 МГц, на высоте расположения облака – 1200 МГц. Проанализирована возможность воздействия импульсов электромагнитного излучения облачных разрядов с выявленными спектральными характеристиками на цифровые элементы наземных кибер-физических систем и летательных аппаратов, функционирующих в частотных диапазонах от единиц МГц до единиц ГГц.

**Ключевые слова:** искусственное грозовое облако, электромагнитное излучение, спектральные характеристики, разрядные явления, внутриоблачная молния, группы модельных гидрометеоров, широкополосная антенна, вейвлетный анализ, частотный диапазон.

Spectral characteristics, received on the base of wavelet analysis, of an electromagnetic radiation of the cloud discharges initiated by the model hydrometeor groups in an artificial thundercloud have been presented. It was established that the spectral characteristics depend on a disposition of the cells with a different polarity relative to the ground, on a disposition of the model hydrometeor groups in the cloud, and on a kind of their combining into a whole array. Characteristic frequency ranges in a spectrum of a electromagnetic radiation of the cloud

discharges registered on a ground surface and on a height of the artificial thundercloud position have been determined. It was proposed that the large hail arrays will differently modify the spectrum of an electromagnetic radiation of the cloud discharges in thundercloud in dependence on the movement of these hail arrays near the regions of a positive and negative charge of thundercloud. It was established that the upper frequencies in the signal spectrum that registered on the ground surface could achieve 400 MHz, on the cloud disposition height – 1200 MHz. Possibility of an affection of the electromagnetic radiation impulses of the cloud discharges with the found spectral characteristics on the digital elements of the ground cyber-physical systems and aircrafts functioning in the frequency ranges from the units of megahertz to the gigahertz units has been analyzed.

**Key words:** artificial thundercloud, electromagnetic radiation, spectral characteristics, discharge phenomena, intracloud lightning, model hydrometeor groups, wideband antenna, wavelet analysis, frequency range.

*Электротехника, 2021, №4, стр. 22-30*

### **Широкополосная модель повышающего трансформатора в составе высокочастотного агрегата питания электрофильтров**

ЖУЙКОВ А.В., КУБАТКИН М.А., МАТВЕЕВ Д.А., ФРОЛОВ М.В., ХРЕНОВ С.И., ЛАРИН В.С., НИКУЛОВ И.И.

Высокочастотные агрегаты питания электрофильтров реализуют новую и перспективную технологию, способную обеспечить более высокую степень газоочистки на тепловых электростанциях и промышленных предприятиях по сравнению с традиционными технологиями на основе низкочастотных агрегатов питания с тиристорным управлением. При разработке высокочастотных агрегатов питания особое внимание следует уделять проектированию повышающего трансформатора, обладающего высокими номинальными значениями выходного напряжения и мощности при рабочей частоте порядка единиц–десятков килогерц. Конструктивные особенности такого трансформатора существенно влияют на характеристики высокочастотного агрегата питания электрофильтра в целом. В статье предложен подход к формированию широкополосной расчетной модели трансформатора, корректной в широком частотном диапазоне – в низко- и высокочастотной области. Она позволяет моделировать процессы в трансформаторе совместно с внешней цепью, при этом становится возможен анализ влияния конструкции трансформатора на характеристики агрегата в целом, и анализ условий работы самого

трансформатора, что особенно важно на стадии проектирования устройства.

**Ключевые слова:** электрофильтр, высокочастотный агрегат питания, высокочастотный трансформатор, моделирование трансформаторов, широкополосная модель трансформатора.

High-frequency power supplies for electrostatic precipitators implement a new and promising technology which is capable of providing more efficient gas conditioning on thermal power plants and factories as compared to conventional technologies based on low-frequency thyristor-based power supplies. During the design process of high-frequency power supplies one should pay a special attention to the design of step-up transformer which features high output voltage and power along with operating frequency of several up to tens of kHz. Construction features of this transformer greatly influences characteristics of the whole high-frequency power supply. In this paper, an approach to wideband transformer modeling is presented which is correct at both low and high frequencies. This approach allows the simulation of transients in transformer together with external circuit; moreover, this approach allow the analysis both the influence of transformer construction on power supply characteristics and transformer operating conditions, which is important at the design stage.

**Key words:** electrostatic precipitator, high-frequency power supply unit, high-frequency transformer, transformer modeling, wideband transformer model.

*Электротехника, 2021, №4, стр. 31-36*

### **Расчет углов коммутации выпрямительно-инверторного преобразователя**

МАЗНЕВ А.С., СЫЧУГОВ А.Н., ВОЛОВ А.В., МАРКОВ К.В.

В России более 24 тыс. км. железных дорог электрифицировано переменным током. Для перевозочной работы в грузовом и пассажирском движении эксплуатируются электровозы и электропоезда, оборудованные выпрямительно-инверторными преобразователями.

Технически комплект электрооборудования представляет собой многозонный мостовой выпрямитель, работающий на активно-индуктивную нагрузку. Одним из главных недостатков такой схемы является низкое значение коэффициента мощности. При определении итогового значения коэффициента мощности необходимо учитывать три фактора: уровень пульсаций выпрямленного тока, несинусоидальность и продолжительность коммутации. В статье получены основные выражения для

определения длительности коммутации при работе выпрямительно-инверторного преобразователя для тягового подвижного состава переменного тока, выполнен расчет электрических параметров обмоток тягового трансформатора.

**Ключевые слова:** выпрямительно-инверторный преобразователь, энергетическая эффективность, коэффициент мощности.

In Russia, more than 24 thousand km. railways are electrified with alternating current. To carry out transportation work in freight and passenger traffic, electric locomotives and electric trains equipped with rectifier-inverter converters are used. Technically, the set of electrical equipment is a multi-zone bridge rectifier operating on an active – inductive load. One of the main disadvantages of such a scheme is the low power factor. When determining the final value of the power factor, three factors must be taken into account: the magnitude of the ripple of the rectified current, non-sinusoidality and the duration of the switching. In the article, the main expressions for determining the duration of switching during the operation of a rectifier-inverter converter for alternating current traction rolling stock are obtained, the electrical parameters of the traction transformer windings are calculated.

**Key words:** rectifier-inverter converter, energy efficiency, power factor.

*Электротехника, 2021, №4, стр. 36-40*

### **Об автоматической стабилизации напряжения контактной сети электрического подвижного состава**

САЦУК Т.П., ШАРЯКОВ В.А., ШАРЯКОВА О.Л., КОВАЛЁВ Д.А., ВОРОБЬЕВ А.А., МАКАРОВА Е.И.

Увеличение интенсивности движения электрического подвижного состава, повышение скорости сообщения наряду с получением необходимых динамических характеристик и широким применением современных транзисторных тяговых преобразователей оказывает существенное влияние на контактную сеть, вызывая провалы и всплески напряжения. В статье рассматривается возможность стабилизации напряжения на участке контактной сети за счет применения автоматического стабилизатора напряжения, использующего энергию, накопленную в накопителе электрической энергии. В качестве стабилизатора напряжения используется реверсивный транзисторный преобразователь, выполняющий роль зарядно-разрядного устройства для накопителя электрической энергии. На основе предложенных формул построена математическая модель, основное преимущество

которой – использование реальных данных, полученных во время движения подвижного состава городского электротранспорта. Результаты исследований показывают возможность снижения влияния подвижного состава на напряжение контактной сети при применении стабилизатора напряжения, использующего энергию накопителя.

**Ключевые слова:** городской электротранспорт, электрический подвижной состав, тяговый электропривод, автоматическая стабилизация напряжения контактной сети, рекуперативное торможение, накопитель энергии, суперконденсатор, математическое моделирование.

Electric rolling stock has a significant impact on the contact network. An increase in the intensity of movement of electric rolling stock, an increase in the speed of communication, along with obtaining the necessary dynamic characteristics and the widespread use of modern transistor traction converters causes dips and voltage surges. The paper considers the possibility of voltage stabilization in the contact network section by using an automatic voltage stabilizer that uses the energy stored in the electric energy storage device. As a voltage stabilizer, a reversible transistor converter is used in the work, which acts as a charging and discharging device for the storage of electrical energy. On the basis of the formulas proposed in the paper, a mathematical model is constructed. The main advantage of the applied model is the use of real data obtained during the movement of the existing rolling stock of urban electric transport. The results of the research show that it is possible to reduce the influence of modern rolling stock on the voltage of the contact network when using a voltage stabilizer that uses the energy stored in the electric energy storage device.

**Key words:** urban electric transport, electric rolling stock, traction electric drive, automatic voltage stabilization of the contact network, regenerative braking, energy storage, supercapacitor, mathematical modeling.

*Электротехника, 2021, №4, стр. 41-45*

**Сушка обмоток асинхронного двигателя током нулевой последовательности**  
ШОГЕНОВ Ю.Х., ШОГЕНОВ А.Х.

Выполнен краткий анализ основных методов сушки обмоток электрических машин в условиях сельскохозяйственного производства и предложен эффективный метод сушки, при котором фазы обмотки подключают к питающей сети через конденсаторы, за счет чего образуется несимметричная система токов, нулевая последовательность которой

увеличивается из-за возникновения резонанса напряжения. Приведена методика расчёта таких установок.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, сушка обмоток, конденсаторы, несимметричная система токов, ток нулевой последовательности, резонанс напряжения.

A brief analysis of the main methods of drying electric machines in agricultural production conditions is made and an effective drying method is proposed, in which their windings are connected to the supply network through capacitors, which forms an asymmetric current system, the zero sequence of which increases due to the occurrence of voltage resonance. The method of calculating such installations is given.

**Key words:** asynchronous motor, drying of windings, capacitors, asymmetric current system, zero-sequence current, voltage resonance.

*Электротехника, 2021, №4, стр. 45-49*

#### **Методы определения характеристик криотоковводов переменного тока**

ЖЕЛТОВ В.В., БУЯНОВ Ю.Л., КОПЫЛОВ С.И., АРХАНГЕЛЬСКИЙ А.Ю., БАЛАШОВ Н.Н.

Приведены аналитические выражения для расчёта геометрических характеристик высоковольтных сильноточных криотоковводов переменного тока. Разработан и описан алгоритм вычислений температурной зависимости удельного сопротивления и коэффициента теплопроводности технической меди при низких температурах в зависимости от чистоты металла.

**Ключевые слова:** ВТСП кабели электропередачи, токовводы для криогенных устройств, расчет.

Analytical expressions are given for calculating the geometrical characteristics of high-voltage high-current cryogenic current leads of alternating current. An algorithm has been developed and described for calculating the temperature dependence of the specific resistance and thermal conductivity coefficient of technical copper at low temperatures, depending on the purity of the metal.

**Key words:** HTS power cables, AC cryogenic current leads, calculation.



*Электротехника, 2021, №4, стр. 50-55*

**Матрица упругих коэффициентов шихтованного сердечника электрической машины**  
ИВАНОВ А.В.

Предложена инженерная методика расчета элементов матрицы упругих коэффициентов шихтованного сердечника электрической машины. Методика основана на представлении сердечника в виде сплошного тела, изготовленного из ортотропного материала, механические параметры которого определяются по экспериментальным значениям модулей упругости сердечника вдоль и поперек листов стали.

**Ключевые слова:** электрическая машина, шихтованный сердечник, матрица упругих коэффициентов.

An engineering method for calculating the elements of the matrix of elastic coefficients of the laminated core of an electric machine is proposed. The method is based on the representation of the core as a solid body made of an orthotropic material, the mechanical parameters of which are determined by the experimental values of the core's elastic modulus along and across the steel sheets.

**Key words:** electric machine, laminated core, matrix of elastic coefficients.

*Электротехника, 2021, №4, стр. 56-61*

**Обзор современного состояния электромагнитных контакторов с электронным управлением**

САГАРАДЗЕ Е.В., ИВАНОВ И.П., ФЕДИМИРОВ А.А., ДЕРГАЧЕВ П.А.

Рассмотрены конструкции и технические характеристики высоковольтных электромагнитных контакторов с электронным управлением, выпускаемых зарубежными фирмами (Siemens, ABB, EATON). В обзоре использованы результаты анализа и исследовательских испытаний образцов разных фирм, информационные материалы и каталоги. При незначительных отличиях технических характеристик конструкции контакторов существенно отличается друг от друга, но основные конструктивные параметры (зазор, усилие контактного нажатия и т.п.) отличаются несущественно. Рассмотрены подходы к проектированию российских аналогов высоковольтных электромагнитных контакторов с электронным управлением.

**Ключевые слова:** электромагнитные контакторы с электронным управлением,

интеллектуальные контакторы, контактно-дугогасительная система, электромагнит, блок электронного управления.

The article provides an assessment of the design and technical characteristics of high-current electromagnetic contactors with electronic control, manufactured by foreign companies (Siemens, ABB, EATON). In this case, the results of analysis and research tests of samples of different companies, and a review of information materials and catalogs were used. With slight differences in the technical characteristics of the design of the contactors, it differs significantly from each other, but the main structural parameters (clearance, contact pressing force, etc.) do not differ significantly. Approaches to the design of Russian analogues of high-current electromagnetic contactors with electronic control are given.

**Key words:** electronically controlled electromagnetic contactors, intelligent contactorcontact-extinguishing system, electromagnet, electric control group.

*Электротехника, 2021, №4, стр. 62-64*

**Авторы номера**

*Электротехника, 2021, №4, стр. 65-65*

**Огоньков В.Г. (к 80-летию со дня рождения)**