

Содержание

Электротехника, 2024, №4, стр. 2-7

Влияние электромагнитного излучения молнии на волоконно-оптические линии связи

БЕЛОВА О.С., ТЕМНИКОВ А.Г., ЧЕРНЕНСКИЙ Л.Л., КОЛЕСНИКОВ О.В., ЛЫСОВ Н.Ю., ПАИМЦЕВ Г.П.

Изложены результаты физического моделирования влияния электромагнитного излучения разрядов молнии и грозовых облаков на полностью диэлектрические и бронированные волоконно-оптические кабели. Моделирование разрядов молнии выполнено с помощью экспериментальной установки, позволяющей создавать искусственные электрически активные облака. Показано, что разряды из искусственного грозового облака вблизи волоконно-оптического кабеля вызывают быстрые изменения угла поворота плоскости поляризации излучения, передаваемого по кабелю. Этот эффект наблюдается и для бронированных, и для полностью диэлектрических волоконно-оптических кабелей небольшой длины. Полностью диэлектрические кабели большей длины оказываются менее чувствительными к быстрым изменениям электромагнитного поля, но чувствительны к медленным изменениям электрического поля.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, молния, грозовое облако, электромагнитное излучение, состояние поляризации, эффект Фарадея.

The results of physical modeling of the effect of electromagnetic radiation from lightning discharges and thunderclouds on fully dielectric and armored fiber-optic cables are presented. Lightning discharges were simulated using an experimental setup that allows the creation of artificial electrically active clouds. It is shown that discharges from an artificial thunderstorm cloud near a fiber-optic cable cause rapid changes in the angle of rotation of the polarization plane of radiation transmitted through the cable. This effect is observed for both armored and fully dielectric fiber optic cables of small length. Fully dielectric cables of longer length are less sensitive to rapid changes in the electromagnetic field, but are sensitive to slow changes in the electric field.

Key words: fiber-optic communication lines, lightning, thundercloud, electromagnetic radiation, polarization state, Faraday effect.

Электротехника, 2024, №4, стр. 8-12

О воздействии сильных электромагнитных полей на волоконно-оптические линии связи

КАЗАНЦЕВ С.Ю., БЕЛОВА О.С., БОЛОТОВ Д.В., ЕЛФИМОВ С.А., КОВАЛЕВ Д.И., ЖУЛИКОВ С.С.

Изложены результаты физического моделирования воздействия электромагнитного излучения молнии на волоконно-оптические линии связи, выполненного с помощью генератора тока молнии. При моделировании тока молнии формировалась первая компонента тока молнии – импульс тока первого обратного разряда с амплитудой более 190 кА и длительностью фронта 4 мкс. Полностью диэлектрический волоконно-оптический кабель находился на разном расстоянии от разрядного промежутка или вне экранированного помещения, в котором размещался генератор тока молнии. В качестве сигнала, передаваемого по волоконно-оптическому кабелю, использовалось линейно поляризованное излучение. Поворот плоскости поляризации регистрировался путем измерения мощности передаваемого сигнала. Выявлено быстрое изменение состояния поляризации передаваемого сигнала в момент разряда генератора тока молнии. Скачок мощности оптического излучения наблюдался для кабеля, проложенного вблизи и на удалении от разрядного промежутка. Мощность оптического излучения, передаваемого по кабелю, проложенному вне экранированного помещения, практически не изменялась в момент разряда. Сделано предположение о том, что электрическая составляющая электромагнитного поля, индуцируемого разрядом молнии, вносит более существенный вклад в поворот плоскости поляризации по сравнению с магнитной составляющей.

Ключевые слова: полностью диэлектрический волоконно-оптический кабель, электромагнитное излучение молнии, генератор тока молнии, состояние поляризации.

The results of a physical simulation of the effect of electromagnetic radiation from lightning on fiber-optic communication lines performed using a lightning current generator are presented. When modeling the lightning current, the first component of the lightning current was formed – a pulse of the first reverse discharge current with an amplitude of more than 190 kA and a front

duration of 4 microseconds. The fully dielectric fiber-optic cable was located at different distances from the discharge gap or outside the shielded room in which the lightning current generator was located. Linearly polarized radiation was used as a signal transmitted over a fiber-optic cable. The rotation of the polarization plane was recorded by measuring the power of the transmitted signal. A rapid change in the polarization state of the transmitted signal was revealed at the moment of discharge of the lightning current generator. A jump in the power of optical radiation was observed for a cable laid near and at a distance from the discharge gap. The power of optical radiation transmitted via a cable laid outside the shielded room practically did not change at the time of discharge. It is assumed that the electrical component of the electromagnetic field induced by lightning discharge makes a more significant contribution to the rotation of the polarization plane compared with the magnetic component.

Key words: fully dielectric fiber-optic cable, electromagnetic radiation of lightning, lightning current generator, polarization state.

Электротехника, 2024, №4, стр. 13-23

Современные изоляционные материалы и среды для высоковольтной техники

ВАРИВООДОВ В.Н., КОВАЛЕВ Д.И., ГОЛУБЕВ Д.В., ЖУЛИКОВ С.С., ЕЛФИМОВ С.А.

В статье выполнен обзор развития изоляционных материалов и сред, применяемых в высоковольтном оборудовании за последние 150 лет. Рассмотрен переход от традиционных диэлектриков, таких как воздух, фарфор и стекло, к современным разработкам на основе полимеров и полимерных композитов. Обсуждается увеличение использования синтетических жидкостей, таких как силиконовые и специализированные масла, а также появление альтернатив, например, жидкого азота для технологических приложений сверхпроводимости. Особое внимание уделено применению различных газов, например, флюоронитрилов и кетонов при различном давлении в качестве альтернативы воздуху и элегазу для газовой изоляции высоковольтного оборудования.

Ключевые слова: изоляция, полимер, композитная изоляция, диэлектрик, флюоронитрилы, кетоны.

The article provides an overview of the development of insulating materials and media used in high-voltage equipment over the past 150 years. The transition from traditional dielectrics such as air, porcelain and glass to modern developments based on polymers and polymer composites is considered. The increasing use of synthetic liquids such as silicone and specialty oils is discussed, as well as the emergence of alternatives, such as liquid nitrogen for technological

applications of superconductivity. Special attention is paid to the use of various gases, for example, fluoronitriles and ketones at different pressures as an alternative to air and gas for gas insulation of high-voltage equipment.

Key words: insulation, polymer, composite insulation, dielectric, fluoronitriles, ketones.

Электротехника, 2024, №4, стр. 24-32

Проблемы создания полимерной композиционной изоляции с высокими электрическими и тепловыми характеристиками

КОВАЛЕВ Д.И., ВАРИВодОВ В.Н., ГОЛУБЕВ Д.В., ЖУЛИКОВ С.С., ЕЛФИМОВ С.А.

Определены основные конструктивные и технологические факторы, влияющие на электрическую прочность композиционной полимерной изоляции. Показано влияние структуры композиционной изоляции на обеспечение высоких электроизоляционных характеристик, рассмотрены основные направления оптимизации этой структуры. Проведен анализ возможности и инструментов повышения электрической прочности полимерной изоляции с учетом имеющихся теоретических и экспериментальных исследований. Выявлены основные пути повышения электрической прочности полимерной композиционной изоляции в зоне соединения полимеров и заливаемых изоляционных или металлических элементов. Сформулированы и обоснованы ключевые направления повышения теплостойкости и теплопроводности полимерной высоковольтной изоляции.

Ключевые слова: полимерная композиционная изоляция, электрическая прочность, теплостойкость, теплопроводность, термофлуктуационная теория.

The main structural and technological factors affecting the electrical strength of composite polymer insulation are determined. The influence of the composite insulation structure on the provision of high electrical insulation characteristics is shown, the main directions of optimization of this structure are considered. The analysis of the possibility and tools for increasing the electrical strength of polymer insulation is carried out, taking into account the available theoretical and experimental studies. The main ways of increasing the electrical strength of polymer composite insulation in the junction zone of polymers and poured insulating or metal elements have been identified. The key directions of increasing the heat resistance and thermal conductivity of polymer high-voltage insulation are formulated and justified.

Key words: polymer composite insulation, electrical strength, heat resistance, thermal conductivity, thermal fluctuation theory.

Электротехника, 2024, №4, стр. 33-39

Влияние поверхностной проводимости на накопление и диссипацию зарядов статического электричества на поверхности полимерных диэлектриков

ЖУЛИКОВ С.С., КОВАЛЕВ Д.И., ТЕМНИКОВ А.Г., КОРОЛЕВ И.В.

Приведены результаты исследований влияния удельной поверхностной проводимости γ_S на накопление и диссипацию зарядов статического электричества (СЭ) на поверхности полимерных диэлектриков. Для исследований были выбраны образцы толщиной $1 \div 5$ мм с удельной объемной проводимостью $\gamma_{V60} \leq 10^{-12}$ Ом⁻¹·м⁻¹. Установлено, что для таких диэлектриков характерно отсутствие установившегося режима после приложения напряжения, так как протекающий через объем диэлектрика ток постоянно снижается. Исследована зависимость γ_S от тангенциальной составляющей напряженности постоянного электрического поля $\gamma_S = f(E_\tau)$ в диапазоне $E_\tau = 5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^5$ В/м. Установлено, что для диэлектриков с базовой поверхностной проводимостью $\gamma_{S0} < 10^{-12}$ Ом наблюдается нелинейная зависимость $\gamma_S = f(E_\tau)$, причем эта нелинейность растет при уменьшении γ_{S0} . Установлено также, что более выраженная нелинейность зависимости $\gamma_S = f(E_\tau)$ характерна для гидрофобных диэлектриков. Выполнено математическое моделирование накопления и диссипации зарядов СЭ без учета и с учетом нелинейной зависимости $\gamma_S = f(E_\tau)$. Сделан вывод о том, что для диэлектриков с $\gamma_{V60} \leq 10^{-12}$ Ом⁻¹·м⁻¹ можно учитывать только поверхностную проводимость, причем, если для гидрофильных диэлектриков $\gamma_S = \text{const}$, то для гидрофобных диэлектриков необходимо принимать во внимание нелинейную зависимость $\gamma_S = f(E_\tau)$.

Ключевые слова: полимерные диэлектрики, статическое электричество, удельная поверхностная и объемная проводимости, тангенциальная составляющая напряженности электрического поля.

The results of studies of the effect of the specific surface conductivity of γ_S on the accumulation and dissipation of static electricity (SE) charges on the surface of polymer dielectrics are presented. Samples with a thickness of 1,5 mm and a specific volumetric conductivity of $\gamma_{V60} \leq 10^{-12}$ Ohm s⁻¹ m⁻¹ were selected for research. It has been found that such dielectrics are characterized by the absence of a steady-state mode after voltage application, since the current flowing through the volume of the dielectric is constantly decreasing. The dependence of γ_S on

the tangential component of the constant electric field strength $\gamma_S=f(E_\tau)$ in the range $E_\tau=5 \cdot 10^2 \div 5 \cdot 10^5$ B/M is studied. It has been found that for dielectrics with a basic surface conductivity of $\gamma_{S0} < 10^{-12}$ Ohm, a nonlinear dependence $\gamma_S=f(E_\tau)$ is observed, and this nonlinearity increases with decreasing γ_{S0} . It has also been found that a more pronounced nonlinearity of the dependence $\gamma_S=f(E_\tau)$ is characteristic of hydrophobic dielectrics. Mathematical modeling of the accumulation and dissipation of SE charges is performed without taking into account and taking into account the nonlinear dependence $\gamma_S=f(E_\tau)$. It is concluded that for dielectrics with $\gamma_{V60} \leq 10^{-12}$ Ohm $s^{-1} m^{-1}$, only surface conductivity can be taken into account, moreover, if for hydrophilic dielectrics $\gamma_S = \text{const}$, then for hydrophobic dielectrics it is necessary to take into account the nonlinear dependence $\gamma_S=f(E)$.

Key words: polymer dielectrics, static electricity, specific surface and volume conductivity, tangential component of electric field strength.

Электротехника, 2024, №4, стр. 40-48

О повышении надежности работы линейных выключателей при отключении воздушных линий электропередач в условиях незначительных отрицательных температур окружающего воздуха

КАЧЕСОВ В.Е., ПЕТРОВА Н.Ф.

При незначительных отрицательных температурах окружающего воздуха на поверхности фарфоровых покрышек линейных выключателей образуются снежные или ледяные мостики, приводящие к существенному снижению электрической прочности покрышек. При продольном пробое внешней изоляции одной из дугогасительных камер полное напряжение прикладывается к остальным камерам, что может привести к их пробую (по поверхности внешней изоляции, между контактами или в результате пробоя делительных конденсаторов). Отключение линейным выключателем воздушной линии сопровождается переходным низкочастотным процессом, в котором кратность перенапряжений на контактах выключателя может достигать 2,15 отн. ед., что с учетом снижения продольной электрической прочности приводит к пробую выключателя. Анализ аварийных отключений показал, что все они происходили при незначительных отрицательных температурах окружающего воздуха. Для снижения вероятности выхода из строя линейных выключателей рассмотрены такие мероприятия, как установка электромагнитных (измерительных) трансформаторов, применение выключателей с шунтирующими резисторами или нелинейными ограничителями перенапряжений.

Ключевые слова: линейный выключатель, атмосферные условия, пробой продольной

изоляции, шунтирующий резистор, электромагнитный трансформатор напряжения, шунтирующий нелинейный ограничитель перенапряжений.

At low negative ambient temperatures, snow or ice bridges form on the surface of the porcelain tires of linear switches, leading to a significant decrease in the electrical strength of the tires. In case of a longitudinal breakdown of the external insulation of one of the arc extinguishing chambers, the full voltage is applied to the remaining chambers, which can lead to their breakdown (along the surface of the external insulation, between contacts or as a result of breakdown of the dividing capacitors). Disconnection of the overhead line by a linear switch is accompanied by a transient low-frequency process in which the multiplicity of overvoltages at the contacts of the switch can reach 2.15 rel. units, which, taking into account the decrease in longitudinal electrical strength, leads to a breakdown of the switch. The analysis of emergency shutdowns showed that all of them occurred at slightly negative ambient temperatures. To reduce the probability of failure of linear switches, such measures as the installation of electromagnetic (measuring) transformers, the use of switches with shunt resistors or nonlinear surge arresters are considered.

Key words: linear switch, atmospheric conditions, breakdown of longitudinal insulation, shunt resistor, electromagnetic voltage transformer, shunt nonlinear surge limiter.

Электротехника, 2024, №4, стр. 49-52

Схмотехнические и технологические способы улучшения технических характеристик силовых тиристоры. Часть 1. Запираемые тиристоры с внешним управлением

ВОРОНИН И.П., ВОРОНИН П.А.

Рассмотрены способы эффективного управления мощными тиристорами с помощью МОП-транзисторов, интегрированных в структуру силового прибора. Показаны особенности работы силовых биполярных транзисторов и запираемых тиристоры в режимах высоких напряжений и повышенных плотностей тока. Представлены варианты гибридных комбинированных схем на основе запираемых тиристоры с интегрированным МОП-управлением. Рассмотрены процессы коммутации запираемых тиристоры с интегрированным управлением в номинальных режимах и при токовых перегрузках. Представлены диаграммы работы тиристоры с внешним управлением.

Ключевые слова: силовые тиристоры, технические характеристики, запираемые тиристоры, полупроводниковый ключ, внешнее управление.

The methods of effective control of high-power thyristors using MOSFETs integrated into the structure of a power device are considered. The features of operation of power bipolar transistors and lockable thyristors in high voltage and high current densities are shown. Variants of hybrid combined circuits based on lockable thyristors with integrated MOSFET control are presented. The switching processes of lockable thyristors with integrated control in nominal modes and under current overloads are considered. Diagrams of the operation of thyristors with external control are presented.

Keywords: power thyristors, technical characteristics, lockable thyristors, semiconductor key, external control.

Электротехника, 2024, №4, стр.53-62

Аналитическое и модельное исследование гибридной судовой электроэнергетической системы

GERMAN-GALKIN S.G., DMITRIEV B.F.

Рассмотрена гибридная судовая электроэнергетическая система, содержащая судовую электрическую сеть с дизель-генераторными агрегатами, валогенератор с синхронной магнитоэлектрической машиной и два активных полупроводниковых преобразователя, объединенных звеном постоянного тока с емкостным фильтром. Преобразователи, управляемые от отдельных систем управления, образуют синхронизированную информационно-энергетическую систему, которая обеспечивает двухсторонний энергетический обмен между судовой электрической сетью и валом главного двигателя при отсутствии буферного накопителя энергии в цепи постоянного тока преобразователей, обеспечивающего длительную компенсацию дисбаланса мощности всей судовой электроэнергетической системы. Рассмотрены способы управления информационно-энергетической системой, позволяющие синхронно изменять направление передачи мощности в судовой электроэнергетической системе и оптимизировать ее энергетические характеристики.

Ключевые слова: гибридная судовая электроэнергетическая система, судовая электрическая сеть, дизель-генераторные агрегаты, активные полупроводниковые преобразователи, синхронизированная информационно-энергетическая система, энергетические характеристики.

A hybrid marine electric power system is considered, containing a marine electrical network with diesel generator sets, a halogen generator with a synchronous magnetoelectric machine and two active semiconductor converters connected by a DC link with a capacitive filter. Converters controlled from separate control systems form a synchronized information and energy system that provides two-way energy exchange between the ship's electrical network and the main engine shaft in the absence of a buffer energy storage in the DC circuit of the converters, providing long-term compensation for the power imbalance of the entire ship's electric power system. The methods of managing the information and energy system are considered, which allow synchronously changing the direction of power transmission in the ship's electric power system and optimizing its energy characteristics.

Key words: hybrid marine electric power system, marine electrical network, diesel generator sets, active semiconductor converters, synchronized information and energy system, energy characteristics.

Электротехника, 2024, №4, стр. 63-70

Исследование качества тока сетевого регулятора с релейной и ШИМ модуляциями КИСЕЛЕВ М.Г.

Рассмотрена работа трехфазного инвертора с выходными дросселями на сеть (сетевой регулятор) в режиме компенсации реактивной мощности. Основное внимание уделено сравнению двум принципиально разным системам управления, основанным на ШИМ– и релейной модуляции. Разработана модель сетевого регулятора, на основе которой получены характеристики качества выходного тока регулятора и коммутационных потерь от частоты модуляции (ширины петли гистерезиса). Рассмотрена работа сетевого регулятора с релейной цифровой системой управления.

Ключевые слова: качество электроэнергии, активный фильтр, ШИМ-модуляция, релейная модуляция.

The operation of a three-phase inverter with output chokes to the network (network controller) in the reactive power compensation mode is considered. The main attention is paid to the comparison of two fundamentally different control systems based on PWM and relay modulation. A model of a network regulator has been developed, on the basis of which the characteristics of the quality of the output current of the regulator and switching losses from the modulation frequency (width of the hysteresis loop) have been obtained. The work of a network

controller with a relay digital control system is considered.

Key words: power quality, active filter, PWM modulation, relay modulation.

Электротехника, 2024, №4, стр. 71-73

Новая редакция национального стандарта ГОСТ Р 54828-2022 «Устройства комплектные распределительные в металлической оболочке с газовой изоляцией (КРУЭ) на номинальные напряжения 110 кВ и выше. Общие технические условия»

КАМАЛОВ Р.С., ФИЛИППОВ А.Е., ЧЕМЕРИС В.С., РЫЖКОВ К.А.

Представлено описание новой редакции ГОСТ Р 54828-2022, в которой актуализированы требования и методы испытаний КРУЭ высокого напряжения, обусловленные накопленным опытом собственных разработок элегазового оборудования и его эксплуатации на энергообъектах России. Разработка предшествующей редакции ГОСТ Р 54828-2011 в основном учитывала опыт эксплуатации КРУЭ иностранных фирм, и документы Международной электротехнической комиссии. В новой редакции ГОСТ Р 54828-2022 предусмотрена обязательность выполнения требований к КРУЭ, дополнены методы испытаний разъединителей, заземлителей и выключателей, предусмотрена обязательность проведения периодических испытаний, сформулированы требования к испытаниям твердой изоляции и другие положения, которые отсутствовали в предшествующей редакции. При публичном обсуждении проекта первой редакции ГОСТ Р 54828-2022 приняли участие представители более 30 предприятий и эксплуатационных организаций, было получено до 300 предложений и замечаний, которые разработчиками новой редакции стандарта были обсуждены с авторами поправок и учтены при подготовке новой редакции стандарта. Ведение в новый ГОСТ повышенных требований к изоляции вызвало необходимость корректировки положений действующих стандартов ГОСТ Р 55195 и ГОСТ Р 55194. Даны рекомендации для внесения в них изменений по испытаниям оборудования с твердой изоляцией напряжением промышленной частоты.

Ключевые слова: комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией, национальный стандарт, новая редакция.

A description of the new edition of GOST R 54828-2022 is presented, which updates the requirements and test methods of high-voltage CRUE, due to the accumulated experience of own development of gas-fired equipment and its operation at power facilities in Russia. The development of the previous edition of GOST R 54828-2011 mainly took into account the experience of operating cruise control systems of foreign companies, and documents of the

International Electrotechnical Commission. The new edition of GOST R 54828-2022 provides for the mandatory fulfillment of the requirements for the CRUE, supplemented the test methods of disconnectors, earthing devices and switches, provides for the mandatory conduct of periodic tests, formulated requirements for testing solid insulation and other provisions that were absent in the previous edition. During the public discussion of the draft of the first edition of GOST R 54828-2022, representatives of more than 30 enterprises and operating organizations took part, up to 300 suggestions and comments were received, which the developers of the new version of the standard discussed with the authors of the amendments and taken into account when preparing the new version of the standard. The introduction of increased insulation requirements in the new GOST caused the need to adjust the provisions of the current GOST R 55195 and GOST R 55194 standards. Recommendations are given for making changes to them for testing equipment with solid insulation with industrial frequency voltage.

Key words: complete switchgear with gas insulation, national standard, new edition.

Электротехника, 2024, №4, стр. 74-75

Авторы номера

Электротехника, 2024, №4, стр. 76-76

Юрий Борисович КАЗАКОВ

(К 70-летию со дня рождения)