

Электротехника, 2026, №4, стр. 1-1

Содержание

Электротехника, 2026, №4, стр. 2-5

Расчет допустимых напряженностей электрического поля изоляторов высоковольтных устройств внутренней установки на номинальное напряжение 35 кВ и выше

КОВАЛЕВ Д.И., ВАРИВодОВ В.Н., ГОЛУБЕВ Д.В., ТАРАСОВА Т.П., КРУГЛИКОВ Д.А.

Определены основные условия и особенности работы полимерной изоляции высоковольтных устройств внутренней установки напряжением 35 кВ и выше. Приведены критерии выбора конструкции полимерных изоляторов и расчета их электрической прочности. Представлены основные соотношения для выбора допустимых напряженностей поля внутри твердого диэлектрика и на его поверхности.

Ключевые слова: полимерная изоляция высоковольтных устройств внутренней установки напряжением 35 кВ и выше, допустимая напряженность электрического поля, электрическая прочность, электростатическое экранирование тройной точки.

The main conditions and features of the polymer insulation of high-voltage indoor devices with a voltage of 35 kV and above are determined. The criteria for choosing the design of polymer insulators and calculating their electrical strength are given. The basic relations for the choice of permissible field strengths inside a solid dielectric and on its surface are presented.

Key words: polymer insulation of high-voltage indoor devices with a voltage of 35 kV and higher, permissible electric field strength, electrical strength, electrostatic shielding of the triple point.

Электротехника, 2026, №4, стр. 6-10

Влияние температуры на электрическую прочность литой эпоксидной изоляции высоковольтного оборудования

ВАРИВодОВ В.Н., ЖУЛИКОВ С.С., КОВАЛЕВ Д.И., АКИНИН Н.А., ГРАУДЫНЬ С.В.

Рассмотрено влияние температуры на электрическую прочность литой эпоксидной изоляции применительно к условиям ее работы в высоковольтном оборудовании. Описана физическая картина механизма влияния температуры на электрическую прочность полимеров. Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости электрической прочности образцов эпоксидной изоляции с залитой металлической арматурой, формирующей при воздействии высокого напряжения слабонеоднородное электрическое поле. Показано, как меняется электрическая прочность таких образцов при изменении структуры изоляции из-за появления трещин и отслоений, вызывающих частичные разряды.

Ключевые слова: высоковольтное оборудование, литые эпоксидные изоляторы, электрическая прочность, газонаполненное оборудование, металлическая арматура.

The effect of temperature on the electrical strength of cast epoxy insulation in relation to its operating conditions in high-voltage equipment is considered. The physical picture of the mechanism of temperature influence on the electrical strength of polymers is described. The results of experimental studies of the dependence of the electrical strength of epoxy insulation samples with embedded metal fittings, which form a weakly uniform electric field when exposed to high voltage, are presented. It is shown how the electrical strength of such samples changes when the insulation structure changes due to the appearance of cracks and detachments causing partial discharges.

Key words: high-voltage equipment, cast epoxy insulators, electrical strength, gas-filled equipment, metal fittings.

Электротехника, 2026, №4, стр. 11-16

Моделирование влияния удара молнии в молниеотвод на помехи в расположенных поблизости волоконно-оптических линиях

БЕЛОВА О.С., БОЛОТОВ Д.В., КАЗАНЦЕВ С.Ю., КИВШАРТ.К., ТЕМНИКОВ А.Г., ПАИМЦЕВ Г.П., ЧЕРНЕНСКИЙ Л.Л.

Выполнено моделирование влияния удара молнии в молниеотвод на помехи в расположенных поблизости волоконно-оптических кабелях. Рассмотрены случаи использования бронированного и полностью диэлектрического кабеля; эксперименты

выполнены для различных конфигураций электродных систем при различной длине кабеля и его высоте над землей. Показано, что броня кабеля может выполнять роль клетки Фарадея, экранируя кабель от воздействия электрического поля.

Зарегистрирован эффект экранирования электрического поля нижним стержневым электродом, моделирующим молниеотвод. В случае длинного, полностью диэлектрического кабеля наблюдалось быстрое изменение состояния поляризации передаваемого сигнала, то есть эффект экранирования возвышающимся заземленным объектом был недостаточен.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия связи, генератор импульсных напряжений, электромагнитное поле, эффект Керра, состояние поляризации.

A simulation of the effect of a lightning strike in a lightning rod on interference in nearby fiber-optic cables has been performed. The cases of using armored and fully dielectric cables are considered; experiments have been performed for various configurations of electrode systems with different cable lengths and its height above the ground. It is shown that the cable armor can act as a Faraday cage, shielding the cable from the effects of an electric field. The effect of electric field shielding by a lower rod electrode simulating a lightning rod is recorded. In the case of a long, fully dielectric cable, a rapid change in the polarization state of the transmitted signal was observed, that is, the shielding effect of a towering grounded object was insufficient.

Key words: fiber-optic communication line, pulse voltage generator, electromagnetic field, Kerr effect, polarization state.

Электротехника, 2026, №4, стр. 17-21

Влияние заземления молниеотвода на работу подземных волоконно-оптических линий связи

ТЕМНИКОВ А.Г., БЕЛОВА О.С., ЖУЛИКОВ С.С., КАЗАНЦЕВ С.Ю., МИЛОСЕРДОВ А.И., ЛЫСОВ Н.Ю., ТЕКЕНОВ А.С.,

При подземной прокладке волоконно-оптических линий связи вблизи заземленных объектов они могут быть подвержены воздействию токов молнии, стекающих с заземлителей этих объектов. Разряд молнии и его электромагнитное излучение способны вызвать изменения состояния поляризации сигнала, передаваемого по линии связи, и внести помехи в его работу. Экспериментами на физической модели показана

возможная неэффективность молниеотвода при его заземлении в грунтах с большим удельным сопротивлением: разряд с высоковольтного электрода может не перехватываться моделью стержневого молниеотвода и через верхние слои грунта поразить расположенную на глубине хорошо заземленную металлическую конструкцию. Таким образом, при прокладке подземных волоконно-оптических кабельных линий в грунте с высоким удельным сопротивлением необходимо учитывать возможность ориентации молнии на металлическую броню самого кабеля или на металлические элементы конструкций, расположенные вблизи кабеля. Кроме того, токи, стекающие через заземляющие устройства, могут оказать косвенное воздействие на подземные линии связи, создавая интенсивное электромагнитное поле; рост напряженности электрического поля может привести к повороту плоскости поляризации передаваемого сигнала и, соответственно, помехам в работе канала связи.

Ключевые слова: подземная волоконно-оптическая линия связи, заземление молниеотвода, электромагнитное поле, состояние поляризации, генератор импульсных напряжений.

When laying fiber-optic communication lines underground near grounded objects, they may be exposed to lightning currents flowing from the grounding conductors of these objects. Lightning discharge and its electromagnetic radiation can cause changes in the polarization state of the signal transmitted over the communication line and interfere with its operation. Experiments on a physical model have shown the possible inefficiency of a lightning rod when it is grounded in soils with high resistivity: a discharge from a high-voltage electrode may not be intercepted by a rod lightning rod model and hit a well-grounded metal structure located at a depth through the upper layers of the soil. Thus, when laying underground fiber-optic cable lines in the ground with high resistivity, it is necessary to take into account the possibility of lightning orientation on the metal armor of the cable itself or on metal structural elements located near the cable. In addition, currents flowing through grounding devices can have an indirect effect on underground communication lines, creating an intense electromagnetic field.; An increase in the electric field strength can lead to a rotation of the plane of polarization of the transmitted signal and, consequently, interference in the operation of the communication channel.

Key words: underground fiber-optic communication line, lightning conductor grounding, electromagnetic field, polarization state, pulse voltage generator.

Электротехника, 2026, №4, стр. 22-25

Моделирование и верификация полимерных изоляционных компаундов

ЕЛФИМОВ С.А., СЕРГЕЕВА А.Э. НЕСТЕРЕНКО А.А., КОВАЛЕВ Д.И.,
МУРАШКИНА Т.И.

Описан процесс моделирования и экспериментальной верификации параметров полимерного композиционного изоляционного компаунда, применяемого в высоковольтной технике. На основе представительного объема построена гомогенизированная расчетная модель; модель экспортировалась в STEP формат и рассчитывалась методом конечных элементов для определения эффективных значений ϵ , σ и $\text{tg}\delta$ при изменении фракционного состава наполнителя. Изготовлены лабораторные образцы с различными типами наполнителя при фиксированных объемных долях компонентов и проведено сопоставление расчетных и измеренных характеристик. Для согласования модели с экспериментальными данными выполнена параметрическая идентификация свойств фаз с использованием линейного правила осреднения по объемным долям и введением корректирующих коэффициентов к исходным параметрам компонентов.

Ключевые слова: полимерный изоляционный компаунд, композиционные диэлектрики, численное моделирование, метод конечных элементов, представительный объем, верификация экспериментом.

The process of modeling and experimental verification of the parameters of a polymer composite insulating compound used in high-voltage engineering is described. Based on the representative volume, a homogenized computational model was built; the model was exported to STEP format and calculated using the finite element method to determine the effective values of ϵ , σ and $\text{tg}\delta$ when the fractional composition of the filler changes. Laboratory samples with different types of filler were made with fixed volume fractions of components and the calculated and measured characteristics were compared. To align the model with experimental data, parametric identification of phase properties was performed using a linear volume-fraction averaging rule and the introduction of correction coefficients to the initial component parameters.

Key words: polymer insulating compound, composite dielectrics, numerical modeling, finite element method, representative volume, experimental verification.

Электротехника, 2026, №4, стр. 26-30

Новые композитные эпоксидные компаунды с улучшенными механическими характеристиками для электротехнических применений

ГАЛИМОВА А.В., ЕЛФИМОВ С.А., КРУГЛИКОВ Д.А., АКИНИН Н.А., ТКАЧЕНКО С.Н.

Представлены результаты разработки серии новых эпоксидных композиционных компаундов для электротехнических применений с акцентом на повышение механических характеристик при сохранении требуемых электроизоляционных свойств. Сформирована единая экспериментальная серия образцов, изготовленных по одинаковой технологии на основе эпоксидной матрицы с варьированием типа наполнителя; дополнительно изготовлен базовый образец без наполнителей. Проведён комплекс испытаний электрических параметров, а также механических характеристик (растяжение и сжатие). Получены значения электрофизических и прочностных показателей для всех композиций, выполнено сопоставление влияния природы и морфологии наполнителей на параметры материалов.

Ключевые слова: эпоксидные компаунды, полимерные композиционные материалы, механические свойства, электрическая изоляция, наполнители, испытания.

The results of the development of a series of new epoxy composite compounds for electrical engineering applications with an emphasis on improving mechanical characteristics while maintaining the required electrical insulation properties are presented. A single experimental series of samples was formed, made using the same technology based on an epoxy matrix with varying types of filler; additionally, a basic sample was made without fillers. A set of tests of electrical parameters, as well as mechanical characteristics (tension and compression) was carried out. The values of electrophysical and strength parameters for all compositions were obtained, and the influence of the nature and morphology of fillers on the parameters of materials was compared.

Key words: epoxy compounds, polymer composite materials, mechanical properties, electrical insulation, fillers, tests.

Калибровка имитационной модели трехфазного трансформатора по экспериментальным осциллограммам напряжений и токов холостого хода
ТИХОНОВ А.И., КРАСОВСКИЙ А.Б., СТУЛОВ А.В., ПОДОБНЫЙ А.В. СНИТЬКО И.С., ИСАЕВА М.В., ОВСЯНИНКОВ А.Г.

Предложен метод калибровки имитационной модели трехфазного трансформатора со стержневым магнитопроводом по опытным осциллограммам токов и напряжений, позволяющий воспроизводить с повышенной достоверностью вид осциллограмм фазных токов в режиме установившегося холостого хода устройства. Калиброванная модель может использоваться в качестве цифрового двойника реального трансформатора, в том числе, для диагностики повреждений магнитной системы устройства без его демонтажа и разборки. Предложенный алгоритм калибровки моделей основан на генетических алгоритмах решения системы нелинейных уравнений для расчета кривых намагничивания элементов магнитной системы трансформатора. Алгоритм реализован в среде MATLAB Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystems. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными показало, что калиброванные модели более достоверно, чем известные модели, воспроизводят характер изменения токов и напряжений, в частности, среднее отклонение расчетных кривых от экспериментальных осциллограмм токов не превышает 10 %.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор со стержневым магнитопроводом, имитационное моделирование, генетические алгоритмы, MATLAB Simulink.

A method is proposed for calibrating a simulation model of a three-phase transformer with a core magnetic circuit based on experimental current and voltage waveforms, which makes it possible to reproduce with increased reliability the type of phase current waveforms in the steady-state idle mode of the device. The calibrated model can be used as a digital twin of a real transformer, including for diagnosing damage to the device's magnetic system without disassembling it. The proposed model calibration algorithm is based on genetic algorithms for solving a system of nonlinear equations for calculating the magnetization curves of the elements of the magnetic transformer system. The algorithm is implemented in the MATLAB Simulink environment using the SimPowerSystems library. A comparison of the simulation

results with experimental data has shown that the calibrated models reproduce the pattern of current and voltage changes more reliably than the known models, in particular, the average deviation of the calculated curves from the experimental current waveforms does not exceed 10%.

Key words: three-phase transformer with a core magnetic core, simulation modeling, genetic algorithms, MATLAB Simulink.

Электротехника, 2026, №4, стр. 41-46

Аморфные магнитомягкие материалы для применения в электрических машинах: свойства и параметры

ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ОХОТНИКОВ М.В., ДЕМИН А.Ю., УРАЗБАХТИН Р.Р.

Рассмотрены свойства аморфных магнитомягких материалов (АММ), производимых в России и за рубежом. Приведены кривые намагничивания АММ, выполнена их экстраполяция для некоторых марок АММ, рассмотрены их удельные потери. Выполнена верификация параметров АММ, полученных путем экстраполяции. Приведены выводы о результатах верификации параметров АММ, полученных методом экстраполяции и предложены актуальные направления для будущих исследований.

Ключевые слова: электрические машины, магнитомягкие материалы, аморфные магнитомягкие материалы, кривая намагничивания, удельные потери.

The properties of amorphous magnetically soft materials (AMM) produced in Russia and abroad are considered. The magnetization curves of AMM are given, their extrapolation is performed for some AMM grades, and their specific losses are considered. Validation of the AMM parameters obtained by extrapolation has been performed. Conclusions about the results of validation of AMM parameters obtained by extrapolation are presented and relevant directions for future research are proposed.

Key words: electric machines, magnetically soft materials, amorphous magnetically soft materials, magnetization curve, specific losses.

Обменные колебания мощности при асимметрии в каналах возбуждения дизель-генераторных агрегатов судовых электроэнергетических систем

ГЕРМАН-ГАЛКИН С.Г., ДМИТРИЕВ Б.Ф.

Рассмотрена проблема статической неустойчивости судовых электроэнергетических систем (СЭЭС). Показано, что эта проблема связана с асимметричной работой каналов возбуждения дизель-генераторных агрегатов, работающих при параллельном включении на общую нагрузку. Расчет основных характеристик СЭЭС при несимметричном режиме работы осуществляется на базе геометрических соотношений векторных диаграмм. Рассчитанные зависимости показали наличие области статической неустойчивости СЭЭС при асимметрии каналов возбуждения.

Динамические процессы в рассматриваемой СЭЭС рассмотрены с использованием имитационной модели. Результаты моделирования подтвердили наличие обменных электромагнитных колебаний в СЭЭС при асимметрии в системах возбуждения.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, дизель-генераторный агрегат, синхронный генератор с электромагнитным возбуждением, колебания мощности.

The problem of static instability of shipboard electric power systems (SEES) is considered. It is shown that this problem is related to the asymmetric operation of the excitation channels of diesel generator sets operating with parallel switching on the total load. The calculation of the main characteristics of the SEES in an asymmetric mode of operation is carried out on the basis of geometric ratios of vector diagrams. The calculated dependences showed the presence of a region of static instability of the SEES with an asymmetry of the excitation channels. Dynamic processes in the considered SEES are considered using a simulation model. The simulation results confirmed the presence of exchange electromagnetic oscillations in the SEES with asymmetry in the excitation systems.

Key words: marine electric power system, diesel generator set, synchronous generator with electromagnetic excitation, power fluctuations.

Электрогенераторы для новых парогазовых циклов с кислородным сгоранием

ТОПЛИВА

ЛАБУТИН А.А., БОРИСОВ Ю.А., КОСОЙ А.А., КРЫСОВ А.В.

Одно из наиболее перспективных решений проблемы выбросов углекислого газа в атмосферу связано с технологией кислородного сжигания топлива и использованием в качестве рабочего тела CO_2 и H_2O в сверхкритическом состоянии. Это требует решения ряда сложных технических проблем, в частности, преобразования механической энергии, генерируемой турбиной, в электроэнергию. Высокая плотность рабочего тела приводит к тому, что оптимальная частота вращения турбины даже при мощностях, измеряемых сотнями мегаватт, значительно превышает 3000 об/мин. Использование механического редуктора, передающего такие мощности при таких частотах вращения, ограничено возможностью его создания. Рассмотрена возможность создания высокочастотного генератора большой мощности с системой преобразования тока. Показано, что создание электрогенератора мощностью более 60 МВт с частотой вращения более 24000 об/мин является реальной задачей.

Ключевые слова: высокооборотный индукторный генератор, кислородное сжигание топлива, генерация электричества, утилизация CO_2 .

One of the most promising solutions to the problem of carbon dioxide emissions into the atmosphere is related to the technology of oxygen fuel combustion and the use of CO_2 and H_2O in a supercritical state as a working medium. This requires solving a number of complex technical problems, in particular, converting the mechanical energy generated by the turbine into electricity. The high density of the working fluid leads to the fact that the optimal turbine rotation speed, even at capacities measured in hundreds of megawatts, significantly exceeds 3,000 rpm. The use of a mechanical gearbox that transmits such power at such rotational speeds is limited by the possibility of its creation. The possibility of creating a high-frequency high-power generator with a current conversion system is considered. It is shown that the creation of an electric generator with a capacity of more than 60 MW with a rotation speed of more than 24,000 rpm is a real task.

Key words: high-speed inductor generator, oxygen combustion of fuel, electricity generation, CO_2 utilization.

Твердотельный контактор для электротехнических комплексов постоянного тока
ВОЛЬСКИЙ С.И., СОРОКИН Д.А., СКОРОХОД Ю.Ю.

В электротехнических комплексах постоянного тока широко используются электромеханические контакторы. Твердотельные контакторы на базе полупроводникового силового ключа (биполярного транзистора, IGBT, MOSFET и т.п.) являются альтернативным вариантом. В большинстве твердотельных контакторов постоянного тока отсутствуют встроенные цепи защиты по напряжению и току, поэтому разработчикам приходится проектировать внешние защитные цепи, что, усложняет использование твердотельных контакторов в электротехнических комплексах. С учетом возможных индуктивностей в цепях электротехнических комплексов постоянного тока предложен расчет параметров встроенных защитных цепей твердотельного контактора постоянного тока. Представлен макет контактора с использованием SICMOSFET и встроенных защитных цепей; контактор имеет управление по CAN интерфейсу. Испытания на макете подтвердили достоверность предложенных расчетных выражений для определения параметров встроенных защитных цепей.

Ключевые слова: электротехнический комплекс постоянного тока, твердотельный контактор постоянного тока, снабберная защитная цепь, кламперная защитная цепь, SICMOSFET.

Electromechanical contactors are widely used in DC electrical engineering systems. Solid-state contactors based on a semiconductor power switch (bipolar transistor, IGBT, MOSFET, etc.) are an alternative option. Most solid-state DC contactors do not have built-in voltage and current protection circuits, so developers have to design external protection circuits, which complicates the use of solid-state contactors in electrical engineering complexes. Taking into account possible inductors in the circuits of DC electrical complexes, the calculation of the parameters of the built-in protective circuits of a solid-state DC contactor is proposed. A contactor layout using SICMOSFET and integrated safety circuits is presented; the contactor is controlled via a CAN interface. Tests on the mock-up confirmed the validity of the proposed calculation expressions for determining the parameters of the built-in protective circuits.

Key words: DC electrical engineering complex, DC solid-state contactor, snubber protection circuit, clamp protection circuit, SICMOSFET.

Электротехника, 2026, №4, стр. 72-79

Метод экспресс-оценки энергоэффективности установки электроприводного центробежного насоса при частотном регулировании

МИШУРИНСКИХ С.В., СЕМЕНОВ А.С., КУХАРЧУК А.В., СМИРНОВ М.О.

С добычей нефти установками электроприводного центробежного насоса (УЭЦН) связана проблема энергетической эффективности при частотном регулировании. Существующие методы оценки эффективности УЭЦН весьма трудоёмки, их применение для решения задач оперативного управления и планирования технологических режимов затруднительно из-за постоянно меняющихся параметров технологического процесса. В статье представлен подход, позволяющий быстро и с высокой точностью оценивать энергетическую эффективность УЭЦН при их функционировании в периодическом режиме. Ключевой особенностью является высокая степень практической применимости как в полевых условиях, так и для интеграции представленного метода в системы автоматизированного управления и алгоритмы помощи принятия решений для предприятий нефтегазодобывающей отрасли. Разработанная полиномиальная зависимость позволяет оперативно определять как приведенный дебит, так и удельное электропотребление, что существенно упрощает практическое применение метода и повышает его универсальность для различных режимов эксплуатации УЭЦН.

Ключевые слова: добыча нефти, установки электроприводного центробежного насоса, частотное регулирование энергетическая эффективность.

The problem of energy efficiency with frequency control is associated with oil production by electric centrifugal pump installations (ECPI). The existing methods for evaluating the effectiveness of ECPI are very time-consuming, and their use for solving operational management and planning tasks is difficult due to the constantly changing parameters of the technological process. The article presents an approach that makes it possible to quickly and accurately assess the energy efficiency of ECPI when they operate in a periodic mode. The key feature is the high degree of practical applicability both in the field conditions and for the integration of the presented method into automated control systems and decision-making algorithms for enterprises of the oil and gas industry. The developed polynomial dependence

makes it possible to quickly determine both the reduced flow rate and the specific power consumption, which greatly simplifies the practical application of the method and increases its versatility for various operating modes of the ECPI.

Key words: oil production, electric centrifugal pump installations, frequency control, energy efficiency.

Электротехника, 2026, №4, стр. 80-86

Методика экспериментального определения магнитных характеристик листов статора

ДЕРГАЧЕВ П.А., КУЗНЕЦОВ Е.А., КУРБАТОВА Е.П., ВЕНЦЕРЕВ М.С.

Статья посвящена оценке магнитных свойств заготовок для статора генератора при производственном контроле. Обоснована применимость предложенных методов с использованием разработанных моделей контроля на основе расчета распределения электромагнитного поля методом конечных элементов в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Выполнены экспериментальные исследования по определению свойств листов статора и их соответствию действующим стандартам с целью обоснования предложенных методик. Для листов статора из стали 2412 определены начальная кривая намагничивания, статическая и динамическая петли магнитного гистерезиса, удельные магнитные потери. Предложенный метод также может быть применен для различных электрических машин в процессе изготовления и обслуживания.

Ключевые слова: заготовки для статора генератора, производственный контроль стали, магнитные свойства стали, удельные магнитные потери.

The article is devoted to the evaluation of the magnetic properties of workpieces for the generator stator during production control. The applicability of the proposed methods using the developed control models based on the calculation of the electromagnetic field distribution by the finite element method in the COMSOL Multiphysics software is substantiated. Experimental studies have been carried out to determine the properties of stator sheets and their compliance with current standards in order to substantiate the proposed methods. The initial magnetization curve, static and dynamic magnetic hysteresis loops, and specific magnetic losses were determined for stator sheets made of steel 2412. The proposed method can also be applied to various electrical machines during the manufacturing and

maintenance process.

Key words: blanks for the generator stator, steel production control, magnetic properties of steel, specific magnetic losses.

Электротехника, 2026, №4, стр. 87-90

Авторы номера