

Содержание

Электротехника, 2026, №8, стр. 2-6

О влиянии размеров литой изоляции на ее электрическую прочность в слабонеоднородных электрических полях

КОВАЛЕВ Д.И., ВАРИВодОВ В.Н., ГОЛУБЕВ Д.В., ТИМОФЕЕВ Е.М., ЖУЛИКОВ С.С.

Рассмотрено влияние размеров литой эпоксидной изоляции на ее электрическую прочность при воздействии напряжения промышленной частоты в слабонеоднородных электрических полях. Выполнен анализ данных, характеризующих зависимость электрической прочности от толщины и объема диэлектрика, а также рассмотрены статистические закономерности пробоя полимерных изоляционных материалов. Приведено описание физического механизма влияния размеров изоляции на вероятность возникновения дефектов и развитие электрического пробоя. Представлено соотношение для расчета зависимости электрической прочности литой эпоксидной изоляции от ее геометрических размеров. Проведены экспериментальные исследования, по результатам которых подтверждено, что при изменении размеров изоляции определяющим параметром для оценки ее электрической прочности является величина «активного» объема диэлектрика. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании литых изоляционных конструкций высоковольтного электрооборудования, работающих в слабо неоднородных электрических полях.

Ключевые слова: литая изоляция, эпоксидная изоляция, электрическая прочность, слабо неоднородное электрическое поле, активный объем диэлектрика.

The effect of the size of cast epoxy insulation on its electrical strength under the influence of industrial frequency voltage in weakly homogeneous electric fields is considered. The analysis of data characterizing the dependence of electrical strength on the thickness and volume of the dielectric is performed, and statistical patterns of breakdown of polymer insulating materials are considered. A description of the physical mechanism of the influence

of insulation dimensions on the probability of defects and the development of electrical breakdown is given. The ratio for calculating the dependence of the electrical strength of cast epoxy insulation on its geometric dimensions is presented. Experimental studies have been carried out, according to the results of which it is confirmed that when changing the size of the insulation, the determining parameter for assessing its electrical strength is the value of the "active" volume of the dielectric. The results obtained can be used in the design of cast insulation structures of high-voltage electrical equipment operating in weakly inhomogeneous electric fields.

Key words: cast insulation, epoxy insulation, electrical strength, weakly inhomogeneous electric field, active volume of the dielectric.

Электротехника, 2026, №8, стр. 7-13

О расчете электрической прочности полимерных изоляторов высоковольтных устройств внутренней установки на номинальное напряжение 35 кВ и выше
ВАРИВООДОВ В.Н., КОВАЛЕВ Д.И., ГОЛУБЕВ Д.В., ТАРАСОВА Т.П., АКИНИН Н.А.

В статье рассматриваются вопросы расчета электрической прочности полимерной изоляции высоковольтных устройств внутренней установки на номинальное напряжение 35 кВ и выше. Определены основные условия эксплуатации и особенности работы такой изоляции в составе высоковольтного оборудования. Показаны критерии выбора конструкции полимерных изоляторов с учетом распределения электрического поля, условий работы твердого диэлектрика и требований к надежности изоляционной системы. Представлены основные соотношения для выбора допустимых напряженностей электрического поля внутри твердого диэлектрика и на его поверхности. Проведен краткий анализ современных методов расчета электростатических полей, применяемых при проектировании изоляционных конструкций высоковольтных устройств. Приведены примеры расчетов, позволяющие оценить распределение напряженности электрического поля и определить наиболее нагруженные области изолятора. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и проверке конструкций полимерных изоляторов для высоковольтного оборудования внутренней установки.

Ключевые слова: высоковольтные устройства, полимерные изоляторы, электрическая

прочность, твердый диэлектрик, электростатическое поле, напряженность электрического поля, оборудование внутренней установки.

The article discusses the issues of calculating the electrical strength of polymer insulation of high-voltage indoor devices with a rated voltage of 35 kV and above. The main operating conditions and features of such insulation as part of high-voltage equipment are determined. The criteria for choosing the design of polymer insulators are shown, taking into account the distribution of the electric field, the operating conditions of a solid dielectric, and the requirements for the reliability of the insulation system. The basic relations for the choice of permissible electric field strengths inside a solid dielectric and on its surface are presented. A brief analysis of modern methods for calculating electrostatic fields used in the design of insulating structures of high-voltage devices is carried out. Examples of calculations are given that make it possible to estimate the electric field strength distribution and determine the most stressed areas of the insulator. The results obtained can be used in the development and verification of polymer insulator designs for high-voltage indoor equipment.

Key words: high-voltage devices, polymer insulators, electrical strength, solid dielectric, electrostatic field, electric field strength, indoor installation equipment.

Электротехника, 2026, №8, стр. 14-22

Расчетно-экспериментальное исследование электростатических свойств литой полимерной изоляции электроустановок напряжением до 35 кВ

ЖУЛИКОВ С.С., КОВАЛЕВ Д.И., НЕСТЕРЕНКО А.А., КРУГЛИКОВ Д.А.

Представлены результаты исследования электростатических свойств новых композиционных материалов на основе эпоксидной смолы с различными наполнителями для оценки их способности накапливать на своей поверхности заряды статического электричества (СЭ). Установлено, что исследуемые композиционные диэлектрики с наполнителем из электрокорунда, стеклянных шариков, битого стекла и вермикулита являются хорошими диэлектриками с постоянной времени диссипации зарядов СЭ 47–1016 сек. Эксперименты по электризации образцов новых композиционных материалов, показали, что максимальная поверхностная плотность зарядов, полученная при трибоэлектризации образцов, составляет $0,33\text{--}0,76\text{ мкКл/м}^2$, а в поле коронного разряда – $32,8\text{--}96,3\text{ мкКл/м}^2$. Расчеты распределения электрического поля в токопроводе 35 кВ при экспериментально полученных значениях поверхностной

плотности избыточных зарядов СЭ, показали, что максимальная напряженность электрического поля между шинами токопровода составляет 0,5–0,6 кВ/мм при трибоэлектризации и 4–7 кВ/мм при электризации в поле коронного разряда. В последнем случае напряженность электрического поля превышает пробивную прочность воздуха при нормальных атмосферных условиях для слабонеоднородного поля, что приводит к перекрытию изоляции в месте выхода шин из изоляционной конструкции токопровода для присоединения к трансформатору.

Ключевые слова: литая полимерная изоляция, заряды статического электричества, шинопровод, токопровод, плотность тока электризации, поверхностная плотность зарядов, удельное объемное сопротивление, постоянная времени релаксации, перекрытие изоляции.

The results of a study of the electrostatic properties of new composite materials based on epoxy resin with various fillers are presented to assess their ability to accumulate static electricity (SE) charges on their surface. It has been established that the studied composite dielectrics with a filler of electrocorundum, glass beads, broken glass and vermiculite are good dielectrics with a charge dissipation time constant of 47–1016 sec. Experiments on the electrification of samples of new composite materials have shown that the maximum surface charge density obtained during triboelectrization of samples is 0,33–0,76 мкКл/м², and in the corona discharge field 32,8–96,3 мкКл/м². Calculations of the electric field distribution in a 35 kV current line with experimentally obtained values of the surface density of excess charges of the SE have shown that the maximum electric field strength between the busbars of the current line is 0,5–0,6 kV/mm during triboelectrization and 4–7 kV/mm during electrification in the corona discharge field. In the latter case, the electric field strength exceeds the penetration strength of air under normal atmospheric conditions for a weakly uniform field, which leads to insulation overlap at the outlet of the tires from the insulating structure of the current line for connection to the transformer.

Key words: cast polymer insulation, static electricity charges, busbar, current line, electrification current density, surface charge density, specific volume resistance, relaxation time constant, insulation overlap.

шинопроводов

ГУ С., ШМЕЛЕВ А.Я., КОВАЛЕВ Д.И., ГАЛИМОВА А.В., АКИНИН Н.А.

Рассмотрено моделирование разрядных процессов в протяженных дефектах твердой литой изоляции шинопроводов. Показано, что дефекты, возникающие в монолитной изоляционной конструкции под действием эксплуатационных факторов, могут располагаться как на границе раздела «компаунд – металл», так и внутри изоляционного слоя, при этом их конфигурация и взаимное расположение существенно влияют на условия возникновения и развития разрядных явлений. Представлена расчетная компьютерная модель коаксиального шинопровода с протяженными газовыми дефектами, расположенными у потенциального и заземленного электродов. Для описания разрядных процессов использована эквивалентная схема, учитывающая емкости газовых включений и твердого диэлектрика, а также элементы, моделирующие зажигание и горение разряда в дефектах. Проведена экспериментальная проверка модели на образце цилиндрического шинопровода с литой изоляцией, показавшая удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных по мощности разрядных явлений. По результатам моделирования повреждений установлено, что в изоляционной системе возможны конфигурации, при которых разряд возникает в большем газовом дефекте при отсутствии разрядных процессов в меньшем дефекте. Отмечено, что такие явления могут возникать даже при небольшом превышении напряжения выше номинального, что необходимо учитывать при приемо-сдаточных испытаниях и контроле технического состояния оборудования.

Ключевые слова: шинопровод, литая изоляция, дефекты изоляции, разрядные процессы, газовые включения, частичные разряды, компьютерное моделирование.

Modeling of discharge processes in extended defects of solid cast insulation of busbars is considered. It is shown that defects that occur in a monolithic insulating structure under the influence of operational factors can be located both at the compound – metal interface and inside the insulating layer, while their configuration and relative location significantly affect the conditions for the occurrence and development of discharge phenomena. A computational computer model of a coaxial busbar with extended gas defects located at the potential and grounded electrodes is presented. To describe the discharge processes, an equivalent scheme is used that takes into account the capacitance of gas inclusions and a solid dielectric, as well as elements that simulate ignition and combustion of a discharge in defects. Gorenje An experimental verification of the model was carried out on a sample of a cylindrical busbar

with cast insulation, which showed a satisfactory agreement between the calculated and experimental data on the power of discharge phenomena. Based on the results of damage modeling, it was found that configurations are possible in the insulation system in which a discharge occurs in a larger gas defect in the absence of discharge processes in a smaller defect. It is noted that such phenomena can occur even with a slight excess of voltage above the rated voltage, which must be taken into account during acceptance tests and monitoring of the technical condition of the equipment.

Key words: busbar, cast insulation, insulation defects, discharge processes, gas inclusions, partial discharges, computer modeling.

Электротехника, 2026, №8, стр. 27-31

Особенности формирования разрядных процессов в грунте с высоким удельным сопротивлением

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

Представлены результаты экспериментального исследования характеристик разрядных явлений, формируемых с модельного заземлителя в грунте. Высокоомный грунт (стеклянный гранулят) приводит к снижению разрядных токов, стекающих с модели заземлителя, по сравнению с чисто воздушным промежутком. Рассмотрено влияние расстояния между электродами, расположенными в стеклянном грунте, на характеристики разрядов между ними. Увеличение расстояния между электродами привело к увеличению длины разрядных каналов и увеличению амплитуды тока разрядов; рост амплитуды тока разрядов, в свою очередь, приводит к увеличению светимости в межразрядном промежутке при увеличении расстояния между электродами.

Ключевые слова: молния, разрядные процессы в грунте с высоким удельным сопротивлением, заземление, моделирование, облако заряженного водного аэрозоля.

The results of an experimental study of the characteristics of discharge phenomena formed from a model grounding device in the ground are presented. A high-resistance ground (glass granulate) leads to a decrease in discharge currents flowing from the grounding device model, compared with a purely air gap. The influence of the distance between electrodes located in a glass ground on the characteristics of discharges between them is considered. An increase in the distance between the electrodes led to an increase in the length of the discharge channels

and an increase in the amplitude of the discharge current; An increase in the amplitude of the discharge current, in turn, leads to an increase in luminosity in the inter-discharge gap with an increase in the distance between the electrodes.

Key words: lightning, discharge processes in soil with high resistivity, grounding, modeling, charged water aerosol cloud.

Электротехника, 2026, №8, стр. 32-36

Исследование частотных характеристик разрядов в грунте с высоким удельным сопротивлением

ТЕМНИКОВ А.Г., БЕЛОВА О.С., ЛЫСОВ Н.Ю., ПАИМЦЕВ Г.П., ЧЕРНЕНСКИЙ Л.Л., МИРЗАБЕКЯН Г.З.

Экспериментально показано, что при протекании импульсного тока через разрядный промежуток в грунте с высоким удельным сопротивлением, в спектре тока разряда преобладают частоты до 4 МГц. Такие частоты оказывают наибольшее влияние на удельное сопротивление и диэлектрическую проницаемость грунта. Также установлено, что именно наличие грунта с низкой проводимостью приводит к смещению характерных частот импульса тока разряда в область частот, оказывающих наибольшее влияние на частотную зависимость параметров грунта.

Ключевые слова: грунт с высоким удельным сопротивлением, искусственное облако заряженного водного аэрозоля, Фурье-анализ, частотные характеристики, спектрограмма.

It has been experimentally shown that when a pulsed current flows through a discharge gap in soil with a high resistivity, frequencies up to 4 MHz prevail in the spectrum of the discharge current. Such frequencies have the greatest effect on the resistivity and permittivity of the soil. It was also found that it is the presence of soil with low conductivity that leads to a shift in the characteristic frequencies of the discharge current pulse to the frequency range that has the greatest effect on the frequency dependence of soil parameters.

Key words: soil with high resistivity, artificial cloud of charged water aerosol, Fourier analysis, frequency characteristics, spectrogram.

Волновая интерпретация спектров сигналов при переходных процессах в линиях электропередачи

АНДРЕЕВ В.В., СЛАВУТСКИЙ А.Л., АЛЕКСЕЕВ В.В., ГАЛАНИНА Н.А.

Переходные процессы в линиях электропередачи, возникающие при коммутациях и в аварийных режимах, сопровождаются бросками тока и напряжения, которые приводят к возникновению высокочастотных биений соответствующих сигналов. Такие высокочастотные составляющие сигналов проявляются прежде всего при высокой частоте дискретизации в измерительных органах, которая используется при волновом определении места повреждения. Высокочастотные биения более ярко выражены в сигналах напряжения, в сигналах тока они сглаживаются за счет индуктивного сопротивления. Точность решения таких задач определяется фиксацией момента начала переходного процесса и информацией о скорости распространения электромагнитных волн в линиях электропередач, которая, в свою очередь, зависит от дисперсии и может изменяться. В работе приводится спектральный анализ высокочастотных составляющих напряжения на линии электропередач 220 кВ при однофазном коротком замыкании на землю. Экспериментальные осциллограммы получены при частоте дискретизации сигналов 1 МГц. Анализируются спектры высокочастотных составляющих напряжения при коротком замыкании и отключении линии. При этом в спектре выделяется набор резонансных частот до 8 кГц и их спектральный состав интерпретируется в рамках волнового рассмотрения. Показано, что резонансные пики в спектре сигналов напряжения соответствуют целому числу четвертьволновых отрезков на пространственных участках между местом короткого замыкания и концами линии, то есть показана возможность пассивного волнового определения места повреждения аналогично активному методу «стоячих волн». Предлагаемый подход позволяет не только решать задачи определения места повреждения, но и оценивать дисперсионные характеристики электромагнитных волн в линиях электропередачи.

Ключевые слова: линии электропередачи, переходные процессы, высокочастотные сигналы, волновая интерпретация спектров сигналов, определение места повреждения.

Transients in power transmission lines that occur during switching and emergency modes are accompanied by surges of current and voltage, which lead to the occurrence of high-frequency beats of the corresponding signals. Such high-frequency components of the signals are manifested primarily at a high sampling rate in the measuring organs, which is used for

wave detection of the damage site. High-frequency beats are more pronounced in voltage signals, and they are smoothed out in current signals due to inductive resistance. The accuracy of solving such problems is determined by fixing the moment of the beginning of the transition process and information about the speed of propagation of electromagnetic waves in power lines, which, in turn, depends on the dispersion and may vary. The paper provides a spectral analysis of the high-frequency voltage components on a 220 kV power line with a single-phase short circuit to earth. The experimental waveforms were obtained at a sampling frequency of 1 MHz. The spectra of high-frequency voltage components in case of short circuit and disconnection of the line are analyzed. At the same time, a set of resonant frequencies up to 8 kHz is allocated in the spectrum and their spectral composition is interpreted within the framework of wave analysis. It is shown that the resonant peaks in the spectrum of voltage signals correspond to a whole number of quarter-wave segments in the spatial sections between the short circuit site and the ends of the line, that is, the possibility of passive wave detection of the damage site is shown in a similar way to the active «standing wave» method. The proposed approach makes it possible not only to solve the problems of determining the location of damage, but also to evaluate the dispersion characteristics of electromagnetic waves in power transmission lines.

Key words: power transmission lines, transients, high-frequency signals, wave interpretation of signal spectra, damage location determination.

Электротехника, 2026, №8, стр. 42-46

Метод инвариантного погружения для моделирования волновых процессов в неоднородных линиях электропередачи

БЫЧКОВ А.В., СЛАВУТСКИЙ Л.А., ДМИТРЕНКО А.М., ЕРЕМЕЕВ Д.Г.

Для моделирования волновых процессов предложено использовать непосредственно волновое уравнение с пространственно-временными флуктуациями скорости распространения волны. Для решения задачи использован метод инвариантного погружения, как эффективный вычислительный инструмент, позволяющий свести волновую задачу с краевыми условиями к задаче с начальными условиями.

Эффективность предлагаемого алгоритма проверена на примере линии электропередачи с пространственно-временной неоднородностью скорости распространения волны. Анализируется структура шумовой составляющей сигнала, возникающей за счёт переотражений волны на пространственных неоднородностях.

Расчёты методом инвариантного погружения сравниваются с расчётами, полученными в приближении однократного рассеяния. Возникающая шумовая составляющая сигнала напряжения оказывается параметрически модулирована промышленной частотой, что приводит к отклонению статистического распределения шума от нормального (гауссова) закона. Результаты качественно согласуются с известными экспериментальными данными. Обсуждается возможность использования предлагаемого подхода для решения обратных волновых задач: оценки пространственной неоднородности линии и определения места повреждения. При применении для решения обратной задачи метода инвариантного погружения результаты могут быть использованы не только при моделировании процессов в линии, но и при обработке экспериментальных осциллограмм тока и напряжения.

Ключевые слова: неоднородные линии электропередачи, метод инвариантного погружения, волновые процессы, моделирование.

To simulate wave processes, it is proposed to use directly the wave equation with spatiotemporal fluctuations in the wave propagation velocity. To solve the problem, the invariant immersion method is used as an effective computational tool that allows reducing a wave problem with boundary conditions to a problem with initial conditions. The effectiveness of the proposed algorithm has been tested using the example of a power transmission line with a spatiotemporal inhomogeneity of the wave propagation velocity. The structure of the noise component of the signal, which occurs due to the re-reflections of the wave on spatial inhomogeneities, is analyzed. The calculations by the invariant immersion method are compared with the calculations obtained in the single scattering approximation. The resulting noise component of the voltage signal is parametrically modulated by the industrial frequency, which leads to a deviation of the statistical distribution of noise from the normal (Gaussian) law. The results are qualitatively consistent with the known experimental data. The possibility of using the proposed approach to solve inverse wave problems is discussed: estimating the spatial heterogeneity of the line and determining the location of damage. When applying the invariant immersion method to solve the inverse problem, the results can be used not only in modeling processes in the line, but also in processing experimental current and voltage waveforms.

Key words: heterogeneous power transmission lines, invariant immersion method, wave processes, modeling.

Оптимальный неадаптивный фильтр ортогональных составляющих с улучшенными динамическими и метрологическими характеристиками для синхронизированных векторных измерений

ФЕДОТОВ Д.А., АНТОНОВ В.И., ДОНИ Н.А., БЫЧКОВ А.В., ДМИТРЕНКО А.М.

В статье рассматривается неадаптивный фильтр ортогональных составляющих с подобными характеристиками, представляющий собой оптимальную по модифицированному критерию наименьших квадратов неадаптивную модель гармоник в ортогональном базисе синусоидальных составляющих базисной частоты. Поясняется основной изъян принципа оптимальной оценки ортогональных составляющих, исходящий из формулировки самой идеи оптимальности на основе предположения, что искомые оценки неизменны на всем окне распознавания. Это предположение входит в противоречие с генеральным свойством ортогональных составляющих и является причиной появления в их оценках колебаний суммарной частоты, приводя в итоге к ухудшению точности измерения синхровекторов в условиях девиации частоты гармоник. Предлагается улучшить оптимальный неадаптивный фильтр, снабжая его специальным оператором заграждения и переформулируя критерий оптимизации с целью усиления заграждающих свойств фильтра по отношению к составляющей суммарной частоты. Применение предлагаемого решения в среде классического фильтра Фурье улучшает его метрологические характеристики, совершенствуя их до уровня требований стандартов к точности измерения синхровекторов. Компромисса между противоречивыми требованиями к метрологическим и динамическим характеристикам синхронизированных векторных измерений удастся достичь путем внедрения в критерий оптимизации заграждающего оператора с виртуальной частотой дискретизации, обладающего свойством фильтра нижних частот и формирующего полосу заграждения благодаря отражению своей частотной характеристики относительно частоты Найквиста.

Ключевые слова: оптимальный неадаптивный фильтр ортогональных составляющих, динамические и метрологические характеристики, синхронизированные векторные измерения, фильтр Фурье, заграждающий оператор составляющей суммарной частоты.

The article considers a non-adaptive orthogonal component filter with similar characteristics, which is an optimal non-adaptive harmonic model based on the modified least squares criterion in the orthogonal basis of the sinusoidal components of the base frequency. The main flaw in the principle of optimal evaluation of orthogonal components is explained, proceeding from the formulation of the very idea of optimality based on the assumption that the desired estimates are unchanged throughout the recognition window. This assumption contradicts the general property of orthogonal components and is the reason for the appearance of total frequency fluctuations in their estimates, resulting in a deterioration in the accuracy of measuring synchro vectors in conditions of harmonic frequency deviation. It is proposed to improve the optimal nonadaptive filter by providing it with a special barrier operator and reformulating the optimization criterion in order to enhance the barrier properties of the filter in relation to the component of the total frequency. The application of the proposed solution in the environment of the classical Fourier filter improves its metrological characteristics, improving them to the level of the requirements of the standards for the accuracy of measuring synchro-vectors. A compromise between the conflicting requirements for the metrological and dynamic characteristics of synchronized vector measurements can be achieved by introducing a barrier operator with a virtual sampling frequency into the optimization criterion, which has the property of a low-pass filter and forms a barrier band by reflecting its frequency response relative to the Nyquist frequency.

Key words: optimal nonadaptive orthogonal component filter, dynamic and metrological characteristics, synchronized vector measurements, Fourier filter, blocking operator of the total frequency component.

Электротехника, 2026, №8, стр. 55-61

Базовые функции идентификации повреждений линии электропередачи при одностороннем наблюдении

ИВАНОВ С.В., ЛЯМЕЦ Ю.Я.

Рассмотрена задача идентификации повреждений линии электропередачи при одностороннем наблюдении. Проблемы возникают из-за недоопределённости задачи, в которой к числу оцениваемых параметров относятся место повреждения, переходные сопротивления, повреждённые фазы и параметры ненаблюдаемой стороны. Частные задачи удалось совместить и рассмотреть под одним углом зрения благодаря выделению базовых функций процедуры идентификации и ставке на интервальную

форму проведения идентификации. За базовые функции приняты граничные условия в месте коротких замыканий (КЗ), представление сложных КЗ в виде наложения однофазных замыканий (междуфазные КЗ не составляют исключения). Сюда же отнесены две ключевые процедуры идентификации: построение информационного портрета КЗ, задаваемого в имитационной модели линии электропередачи, и вторая – определение места повреждения и идентификация повреждённых фаз. Она решается с помощью алгоритмической модели, выстраиваемой без участия неизвестных сопротивлений ненаблюдаемой стороны. Принципиально новым стала информационная операция прохождения места предполагаемого повреждения посредством учёта граничных условий повреждения. Варьируемые параметры разграничены на главные – аварийные, значения которых подлежат определению, и вспомогательные – сопротивления наблюдаемой стороны, задаваемые областями своего определения.

Ключевые слова: линия электропередачи, идентификация повреждений, одностороннее наблюдение, базовые функции.

The problem of identifying damage to a power transmission line under one-sided surveillance is considered. Problems arise due to the underdetermination of the problem, in which the estimated parameters include the location of damage, transient resistances, damaged phases, and parameters of the unobserved side. Particular tasks were combined and considered from one angle due to the allocation of the basic functions of the identification procedure and the emphasis on the interval form of identification. The boundary conditions at the site of short circuits are taken as basic functions, and complex short circuits are represented as superimposed single-phase circuits (phase-to-phase short circuits are no exception). Two key identification procedures are also included here: the construction of an information portrait of the short circuit set in the simulation model of the power transmission line, and the second is the determination of the damage location and identification of the damaged phases. It is solved using an algorithmic model built without the involvement of unknown resistances from the unobserved side. The information operation of passing through the site of the alleged damage by taking into account the boundary conditions of the damage has become fundamentally new. The variable parameters are divided into the main ones – emergency ones, the values of which are to be determined, and auxiliary ones – the resistance of the observed side, set by the areas of its definition.

Key words: power transmission line, damage identification, one-way surveillance, basic functions.

Электротехника, 2026, №8, стр. 62-67

Тестирование цифровой релейной защиты в условиях динамических искажений
БУЛЫЧЕВ А.В., ШАЛИМОВ А.С.

Рассмотрены способы проверки устройств релейной защиты применительно к условиям динамических искажений входных сигналов. Сформированы требования к тестовым сигналам для релейной защиты. Показаны наиболее вероятные динамические искажения сигналов релейной защиты, которые могут быть внесены аналоговыми элементами и цифровой средой, реализованной в соответствии с требованиями МЭК 61850-9-2 SV. Сформированы математические модели тестовых сигналов с соблюдением принципов подобия и учетом возможных искажений. Показаны способы физического моделирования искажений наиболее вероятных в процессе эксплуатации релейной защиты в компьютерно-управляемых испытательных комплексах.

Ключевые слова: цифровая релейная защита, тестирование, динамические искажения, трансформатор тока, преобразователь аналоговых сигналов.

The methods of testing relay protection devices in relation to the conditions of dynamic distortion of input signals are considered. The requirements for test signals for relay protection have been formed. The most probable dynamic distortions of relay protection signals that can be introduced by analog elements and a digital environment implemented in accordance with the requirements of IEC 61850-9-2 SV are shown. Mathematical models of test signals have been formed in compliance with the principles of similarity and taking into account possible distortions. The methods of physical modeling of distortions most likely during the operation of relay protection in computer-controlled test complexes are shown.

Key words: digital relay protection, testing, dynamic distortion, current transformer, analog signal converter.

Электротехника, 2026, №8, стр. 68-74

Снижение потребления электрической энергии на собственные нужды ТЭЦ путем оптимизации работы береговой насосной станции

АФАНАСЬЕВ В.В., КРАСНОВ Е.В., ОХОТКИН Г.П.

Рассмотрена возможность автоматизации управления работой насосных агрегатов береговой насосной станции путем использования частотного преобразователя и/или устройства плавного пуска. Применение преобразователя имеет ограничения по снижению частоты питания электродвигателя насоса менее 33 Гц, связанные с необходимостью преодоления постоянного перепада уровня между береговой станцией и площадкой ТЭЦ, что не обеспечивает оптимальную подачу насосов при нагрузках ТЭЦ менее 200 МВт из-за риска переполнения водосборных бассейнов градирен. Устройство плавного пуска позволяет реализовать циклический режим работы береговой станции в диапазоне электрических нагрузок ТЭЦ от 33 до 400 МВт. Показана возможность снижения потребления электрической энергии на собственные нужды ТЭЦ за счет циклической работы насосов береговой станции при полностью открытых задвижках с помощью устройства плавного пуска, управляемого сигналом датчика уровня в водосборном бассейне градирни. Приводится схема управления групповым плавным пуском трех насосов береговой станции с помощью одного устройства плавного пуска. Проведена оценка экономии электрической энергии на собственные нужды ТЭЦ.

Ключевые слова: береговая насосная станция, градирня, устройство плавного пуска, схема управления, экономия электрической энергии.

The possibility of automating the operation control of pumping units of a coastal pumping station by using a frequency converter and/or a soft starter is considered. The use of the converter has limitations in reducing the frequency of the pump's electric motor to less than 33 Hz, due to the need to overcome the constant level difference between the coastal station and the thermal power plant site, which does not ensure optimal pump supply at thermal power plant loads of less than 200 MW due to the risk of overflow of the cooling tower catchment basins. The soft-start device makes it possible to implement a cyclic operation mode of the coastal station in the range of electric loads of the thermal power plant from 33 to 400 MW. It is shown that it is possible to reduce the consumption of electric energy for the thermal power plant's own needs by cycling the pumps of the coastal station with the valves fully open using a soft-start device controlled by a level sensor signal in the cooling tower catchment area. A control scheme for the group soft-start of three pumps of a coastal station using a single soft-start device is presented. An assessment of the savings of electric energy for the thermal power plant's own needs has been carried out.

Key words: onshore pumping station, cooling tower, soft-start device, control circuit, saving electrical energy.

Электротехника, 2026, №8, стр. 75-82

Исследование эксплуатационных свойств гибридных лакокрасочных материалов на основе полиметилфенилсилоксан-эпоксидных связующих и 3-аминопропилтриэтоксисилана

ВАСИЛЬЕВ А.Б., ПАТЬЯНОВА А.О., БОРОВКОВ М.С., АЛЕКСАНДРОВ Р.И.,
ИВАНОВА К.Ю., КУЗЬМИН М.В.

Рассмотрена возможность улучшения технологических и физико-механических свойств гибридных лаковых покрытий на основе полиметилфенилсилоксановой смолы (ПМФС) путём её модификации эпоксидиановыми смолами с использованием 3-аминопропилтриэтоксисилана (3-APTES) в качестве полифункционального отвердителя. Установлено, что введение эпоксидной смолы в количестве 30–40 мас. ч. на 100 мас. ч. ПМФС совместно со стехиометрическим количеством 3-APTES улучшает прочность, эластичность и устраняет липкость покрытий по сравнению с немодифицированной ПМФС. Экспериментально изучена возможность использования эпоксидных смол марок ЭД-16, ЭД-20 и Э-40 в качестве модификаторов ПМФС. Исследованы вязкость, плотность, время высыхания, прочность, относительное удлинение, модуль упругости, твёрдость, термостабильность, а также удельное объёмное и поверхностное электрическое сопротивление. Показан механизм двойного отверждения: аминогруппы 3-APTES реагируют с эпоксидными группами, а этоксигруппы после гидролиза конденсируются с силанольными группами ПМФС, формируя единую гибридную сетку. Использование эпоксидной смолы Э-40 в количестве 30 мас. ч. позволяет получить максимальный синергетический эффект: повышается прочность и эластичность покрытий, устраняется липкость, при этом диэлектрические характеристики сохраняются на уровне, характерном для высококачественных электроизоляционных материалов, а термостабильность составляет 400 °С.

Ключевые слова: электроизоляционные покрытия, гибридные лаковые покрытия, полиметилфенилсилоксановая смола, эпоксидиановые смолы, 3-аминопропилтриэтоксисилан, ИК-спектроскопия, физико-механические свойства, термостабильность, диэлектрические свойства.

The possibility of improving the technological and physico-mechanical properties of hybrid varnishes based on polymethylphenylsiloxane resin (PMFS) by modifying it with epoxidian resins using 3-aminopropyltriethoxysilane (3-APTES) as a multifunctional hardener is considered. It was found that the introduction of epoxy resin in an amount of 30-40 wt. h. per 100 wt. h. of PMFS together with a stoichiometric amount of 3-APTES improves the strength, elasticity and eliminates the stickiness of coatings compared with unmodified PMFS. The possibility of using ED-16, ED-20, and E-40 epoxy resins as PMFS modifiers has been experimentally studied. Viscosity, density, drying time, strength, elongation, modulus of elasticity, hardness, thermal stability, as well as specific volume and surface electrical resistance were studied. The mechanism of double curing is shown: amino groups of 3-APTES react with epoxy groups, and ethoxy groups after hydrolysis condense with silanol groups of PMFS, forming a single hybrid network. The use of epoxy resin E-40 in an amount of 30 wt. h. it allows to obtain the maximum synergistic effect: the strength and elasticity of coatings increases, stickiness is eliminated, while the dielectric characteristics are maintained at the level typical for high-quality electrical insulating materials, and the thermal stability is 400 ° C.

Key words: electrical insulating coatings, hybrid lacquer coatings, polymethylphenylsiloxane resin, epoxidian resins, 3-aminopropyltriethoxysilane, IR spectroscopy, physico-mechanical properties, thermal stability, dielectric properties.

Электротехника, 2026, №8, стр. 83-88

Построение комбинированных адаптивных систем управления силовыми преобразовательными устройствами

КРАСНОПЕРОВ Р.Н., АСТАШЕВ М. Г., БУКИН Д.А., КУЗЕНЕВ Д.С., МУХИН А.С., ЗАРЯ Я.И.

В статье рассмотрен подход к построению комбинированных адаптивных систем управления силовыми преобразовательными устройствами, совмещающих классический ПИД-регулятор с агентом обучения с подкреплением. Агент на основе искусственной нейронной сети в реальном времени формирует оптимальное управляющее воздействие, а блок робастности обеспечивает безопасное переключение на заведомо устойчивые настройки классического регулятора при выходе параметров за допустимые пределы. Описана архитектура искусственной нейронной сети прямого

распространения и методика организации обучения с подкреплением с использованием стратегии Томпсоновского сэмплирования в среде компьютерного моделирования.

Верификация предложенного подхода выполнена на примере источника бесперебойного питания двойного преобразования: представлены результаты имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink и экспериментальных исследований на основе методологии Processor-in-the-Loop с развёртыванием системы управления на микроконтроллере STM32 серии F7 (ARM Cortex-M7). Обсуждается универсальность предложенного подхода и его применимость к другим классам силовых преобразователей, в том числе к полупроводниковым коммутационным устройствам регулирования напряжения в линиях электропередачи и на подстанциях 6–10/0,4 кВ.

Ключевые слова: адаптивная система управления, обучение с подкреплением, ПИД-регулятор, комбинированное управление, силовой преобразователь, блок робастности, нейронная сеть, Processor-in-the-Loop, микроконтроллер STM32, регулирование напряжения.

The article considers an approach to the construction of combined adaptive control systems for power converter devices combining a classical PID controller with a reinforcement learning agent. An agent based on an artificial neural network generates optimal control action in real time, and the robustness block ensures safe switching to the obviously stable settings of the classical controller when the parameters exceed the permissible limits. The architecture of an artificial neural network of direct propagation and a methodology for organizing reinforcement learning using the Thompson sampling strategy in a computer modeling environment are described. Verification of the proposed approach was performed using the example of a dual-conversion uninterruptible power supply: the results of simulation modeling in the MATLAB Simulink environment and experimental studies based on the Processor-in-the-Loop methodology with the deployment of a control system on an STM32 microcontroller of the F7 series (ARM Cortex-M7) are presented. The universality of the proposed approach and its applicability to other classes of power converters, including semiconductor switching devices for voltage regulation in power transmission lines and substations of 6-10/0.4 kV, are discussed.

Key words: adaptive control system, reinforcement learning, PID controller, combined control, power converter, robustness block, neural network, Processor-in-the-Loop, STM32 microcontroller, voltage regulation.

Электротехника, 2026, №8, стр. 89-91

Авторы номера