

**Об оптимизации технологии лужения медной проволоки, предназначенной для производства солнечных модулей**

ПАТЪЯНОВА А.О., ИВАНОВА К.Ю., КУЗЬМИН М.В., СЕМЕНОВ В.Л.,  
АЛЕКСАНДРОВ Р.И.

Рассмотрена технология лужения медной проволоки, предназначенной для производства солнечных модулей. Выявлены оптимальные параметры – температура лужения, линейная скорость и др. Установлено, что наилучшие характеристики достигаются при очистке проволоки методом электрохимического обезжиривания. Экспериментально изучена возможность применения проволоки в качестве электродов при изготовлении солнечных модулей по технологии SWCT. Проведены испытания надежности пайки соединений при воздействии высокой влажности и высокой температуры, а также при термоциклировании. Для контроля образцов луженой проволоки измерялись механические и электрические параметры – толщина покрытия, предел прочности на разрыв, относительное удлинение, удельное электрическое сопротивление и сопротивление постоянному току. Испытания подтвердили, что по механическим и электрическим параметрам проволока с покрытием из припоя марки ПОИН-52 соответствует требованиям, предъявляемым к электродам при изготовлении солнечных модулей; климатические испытания также показали высокую степень надежности.

**Ключевые слова:** солнечные модули, пленочно-проволочный электрод, медная проволока, горячее лужение, механические и электрические параметры, климатические испытания, надежность.

The technology of tinning of copper wire intended for the production of solar modules is considered. The optimal parameters – tinning temperature, linear velocity, etc.-were identified. It is established that the best characteristics are achieved when cleaning the wire by electrochemical degreasing. The possibility of using wire as electrodes in the manufacture of solar modules using SWCT technology has been experimentally studied. The reliability of soldering joints under the influence of high humidity and high temperature, as well as during thermal cycling, was tested. To control tinned wire samples, mechanical and electrical parameters were measured – coating thickness, tensile strength, elongation, electrical resistivity, and DC resistance. The tests confirmed that the mechanical and electrical parameters of the wire coated with solder of the POINT-52 brand meet the requirements for the electrodes in the manufacture of solar modules; climatic tests also showed a high degree of reliability.

**Key words:** solar modules, film-wire electrode, copper wire, hot tinning, mechanical and electrical parameters, climatic tests, reliability.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 5-9*

### **Испытания низковольтных автоматических выключателей на предельную отключающую способность**

ВАСИЛЬЕВ С.А., ЕГОРОВ Е.Г., ЕГОРОВ Г.Е., КАДЫШЕВ Е.Н., КУЛАГИНА А.Г., ЛУИЯ Н.Ю., НИКИФОРОВ И.К.

Рассмотрена схема синтетических испытаний низковольтных автоматических выключателей. Приведены условия эквивалентности синтетических испытаний прямым коммутационным испытаниям. Приведены блок-схема синтетических испытаний, рассмотрены испытательные установки, в которых измерительные высоковольтные импульсы накладываются на возвращающееся напряжение, что позволяет оценить реальную коммутационную способность автоматического выключателя. Рассмотрена схема реализации предложенной методики, приведена схема работы испытательного устройства, дано описание работы испытательной схемы. Приведены осциллограммы возвращающегося напряжения и зондирующих импульсов. Даны предложения по определению коммутационной способности путем сравнения характеристик восстанавливающейся прочности и восстанавливающегося напряжения для критического момента времени, когда восстанавливающееся напряжение достигает максимума. Рекомендовано проводить испытания автоматических выключателей на предельную отключающую способность по схеме с контролем времени горения дуги и отсутствия межполюсных перекрытий.

**Ключевые слова:** автоматический выключатель, восстанавливающееся напряжение, восстанавливающаяся прочность, схема испытаний, коммутационная способность.

The scheme of synthetic tests of low-voltage circuit breakers is considered. The conditions of equivalence of synthetic tests to direct switching tests are given. A block diagram of synthetic tests is presented, and test installations in which measuring high-voltage pulses are superimposed on the returning voltage are considered, which allows us to evaluate the real switching capacity of the circuit breaker. The scheme of implementation of the proposed method is considered, the scheme of operation of the test device is given, the description of the operation of the test circuit is given. The oscillograms of the switching processes are given: the returning voltage and the

probing pulses. Proposals are given for determining the switching capacity by comparing the characteristics of the recovering strength and the recovering voltage for the critical moment of time when the recovering voltage reaches a maximum. It is recommended to test circuit breakers for the maximum breaking capacity according to the scheme with the control of the arcing time and the absence of inter-pole overlap.

**Key words:** circuit breaker, recovery voltage, recovery strength, test scheme, switching capacity.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 10-14*

### **К выбору воздушного зазора магнитоэлектрического вентильного двигателя**

АФАНАСЬЕВ А.А., ГЕНИН В.С., КУРБАТОВ П.А., ВАТКИН В.А., ТОКМАКОВ Д.А.

Рассмотрено влияние величины воздушного зазора вентильного двигателя с постоянными магнитами на источники его вибрации и шума электромагнитной природы. Показано, что при увеличении воздушного зазора вдвое среднее значение магнитной индукции в зазоре уменьшается примерно на 4 %, поэтому радиальные электромагнитные силы, пропорциональные квадрату среднего значения индукции, уменьшатся также незначительно. Средние значения электромагнитной мощности и электромагнитного момента снижаются на 2,2 %. Однако увеличение воздушного зазора вызывает достаточно сильное уменьшение высших гармоник магнитной индукции в зазоре, которые являются источником осцилляции электромагнитного момента двигателя. Расчёты показывают, что у двигателя с удвоенным зазором амплитуда переменной составляющей момента снижается на 15 %.

**Ключевые слова:** вентильный двигатель с постоянными магнитами, размер воздушного зазора, высшие гармоники индукции в зазоре, пульсации электромагнитного момента.

The influence of the air gap of a valve motor with permanent magnets on the sources of its vibration and noise of electromagnetic nature is considered. It is shown that when the air gap is doubled, the average value of the magnetic induction in the gap decreases by about 4 %, so the radial electromagnetic forces proportional to the square of the average value of the induction will also decrease slightly. The average values of electromagnetic power and electromagnetic torque are reduced by 2.2 %. However, an increase in the air gap causes a sufficiently strong decrease in the higher harmonics of magnetic induction in the gap, which are the source of the oscillation of the electromagnetic torque of the engine. Calculations show that the amplitude of the variable

component of the torque is reduced by 15% in an engine with a double clearance.

**Key words:** valve motor with permanent magnets, air gap size, higher harmonics of induction in the gap, pulsations of the electromagnetic moment.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 15-20*

### **Анализ характеристик установившегося режима резонансных преобразователей типа LLC**

БЕЛОВ Г.А., МАЛИНИН Г.В., СЕВРИКОВ Л.С., СЕМЕНОВ Ю.М.

Предложена упрощенная методика учета ветви намагничивания при использовании T-образной эквивалентной схемы двухобмоточного трансформатора для анализа резонансного преобразователя постоянного напряжения (ППН) на интервале времени его линейности. Методика позволяет заменить точное описание ППН на интервале его линейности двумя дифференциальными уравнениями первого порядка, что существенно упрощает расчеты. Расчеты процессов на интервале линейности ППН по точным и упрощенным уравнениям показали практически полное совпадение результатов. Решено уравнение для определения начального значения вектора состояния ППН на интервале его линейности в установившемся режиме. Приведены формулы для расчета внешних (нагрузочных) характеристик ППН. Расчетные внешние характеристики с параметрами серийного ППН практически совпадают с экспериментальными, полученными на Simulink-модели.

**Ключевые слова:** резонансный преобразователь постоянного напряжения типа LLC, векторно-матричные уравнения, имитационное моделирование, установившийся режим, внешняя характеристика.

A simplified method for taking into account the magnetization branch when using a T-shaped equivalent circuit of a two-winding transformer for the analysis of a resonant DC voltage converter (DCV) on the time interval of its linearity is proposed. The method allows us to replace the exact description of the PPN in the interval of its linearity with two differential equations of the first order, which greatly simplifies the calculations. Calculations of the processes in the linearity interval of the PPN using exact and simplified equations showed almost complete coincidence of the results. The equation for determining the initial value of the state vector of the PPN on the interval of its linearity in the steady-state mode is solved. Formulas for

calculating the external (load) characteristics of the PPN are given. The calculated external characteristics with the parameters of the serial PPN practically coincide with the experimental ones obtained on the Simulink model.

**Key words:** resonant DC voltage converter of the LLC type, vector-matrix equations, simulation modeling, steady-state mode, external characteristic.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 21-25*

### **Нейросетевой алгоритм восстановления в реальном времени сигнала промышленной частоты при нелинейных искажениях**

СЛАВУТСКИЙ А.Л., СЛАВУТСКИЙ Л.А., АЛЕКСЕЕВ В.В., ДМИТРЕНКО А.М.,  
ТУТАЕВ Г.М.

Такие задачи, как определение уровня гармоник при нелинейных искажениях, выделение амплитуды, фазы и частоты сигнала основной гармоники, во многих случаях требуют обработки сигналов с малой временной задержкой или в режиме реального времени. При стандартных частотах оцифровки сигнала 600–2400 Гц сложно обеспечить точное определение параметров сигнала за время, составляющее доли периода промышленной частоты. В статье показано, что для этого могут использоваться нейросетевые алгоритмы и искусственные нейронные сети прямого распространения с простой структурой. При адекватном обучении и тестировании такой нейронной сети она позволяет восстанавливать параметры сигнала за время в доли периода основной частоты 50 Гц. Показана возможность реализовать обученную нейронную сеть в стандартном микроконтроллере. Алгоритм исследуется на примере восстановления сигнала основной частоты при нелинейных искажениях, когда уровень второй гармоники превышает половину амплитуды сигнала основной частоты. Приводятся оценки погрешности восстановления амплитуды, фазы и частоты сигнала. Показано, что восстановление может быть выполнено в скользящем окне с длительностью от единиц миллисекунд. При этом ошибки восстановления параметров сигнала не превышают единиц процентов. Обсуждается возможность использования предлагаемого алгоритма для обработки сигналов в реальном времени. Проведена проверка и сделаны оценки скорости вычислений для микропроцессоров со стандартными для цифровых подстанций параметрами.

**Ключевые слова:** электрический сигналы, искусственные нейронные сети, нелинейные искажения, фильтрация в реальном времени.

Tasks such as determining the level of harmonics in nonlinear distortions, identifying the amplitude, phase, and frequency of the main harmonic signal, in many cases require signal processing with a small time delay or in real time. With standard signal digitization frequencies of 600-2400 Hz, it is difficult to accurately determine the signal parameters for a time that is a fraction of the industrial frequency period. The article shows that neural network algorithms and artificial neural networks of direct propagation with a simple structure can be used for this purpose. With adequate training and testing of such a neural network, it allows you to restore the signal parameters in a fraction of the period of the fundamental frequency of 50 Hz. The possibility of implementing a trained neural network in a standard microcontroller is shown. The algorithm is studied by the example of restoring the fundamental frequency signal under nonlinear distortions, when the level of the second harmonic exceeds half the amplitude of the fundamental frequency signal. Estimates of the error in restoring the amplitude, phase, and frequency of the signal are given. It is shown that the recovery can be performed in a sliding window with a duration of units of milliseconds. In this case, the errors in restoring the signal parameters do not exceed one percent. The possibility of using the proposed algorithm for real-time signal processing is discussed. The calculation speed was checked and estimated for microprocessors with standard parameters for digital substations.

**Key words:** electrical signals, artificial neural networks, nonlinear distortions, real-time filtering.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 25-30*

### **Дистанционные защиты на основе цифровых методов оценки расстояния до места повреждения**

БУЛЫЧЕВ А.В., ГРИБКОВ М.А., ДМИТРЕНКО А.М., ОХОТКИН Г.П.

Предложены дистанционные защиты с улучшенными характеристиками, в которых использованы цифровые методы определения расстояния от места установки защиты до места повреждения. Преимущества защит обусловлены свойствами цифровой элементной базы, которые позволили осуществлять с приемлемым быстродействием многократные итерационные вычисления параметров линии электропередачи при коротком замыкании в условиях переходных процессов. Результаты исследований подтверждают правомерность теоретических методов построения защиты, принятых допущений и ограничений.

Приведена методика расчета параметров срабатывания предложенной дистанционной защиты.

**Ключевые слова:** релейная защита, дистанционные защиты, цифровые методы, параметры срабатывания.

Remote protection systems with improved characteristics are proposed, which use digital methods for determining the distance from the protection installation site to the damage site. The advantages of the protection are due to the properties of the digital element base, which made it possible to perform multiple iterative calculations of the parameters of the power line with an acceptable speed in the event of a short circuit under transient conditions. The results of the research confirm the validity of the theoretical methods of constructing protection, the accepted assumptions and restrictions. The method of calculating the parameters of the operation of the proposed remote protection is given.

**Key words:** relay protection, remote protection, digital methods, response parameters.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 31-35*

### **Предотвращение возникновения частичных разрядов в твердой изоляции высоковольтных токопроводов**

ВАРИВодов В.Н., КОВАЛЕВ Д.И., ЖУЛИКОВ С.С., ГОЛУБЕВ Д.В., РОМАНОВ В.А.

Показано влияние частичных разрядов, возникающих газовых включениях на кратковременную и длительную электрическую прочность литой эпоксидной изоляции. Выявлено влияние особенностей технологического процесса изготовления токопроводов на развитие этих дефектов. Экспериментально исследованы и выделены наиболее эффективные способы улучшения сцепления эпоксидных компаундов и заливаемых токоведущих элементов. Выявлены закономерности влияния технологических факторов на адгезию и аутогезию литой полимерной изоляции, содержащей внутренне токоведущие элементы применительно к условиям работы их в высоковольтных токопроводах. Обоснованы конкретные технические решения по улучшению адгезии и аутогезии эпоксидных компаундов и исключению газовых включений в литой изоляции, приводящие к повышению электрической прочности и надежности работы высоковольтных токопроводов с литой изоляцией. Подчеркивается, что подобные технические решения необходимы при разработке высоковольтных токопроводов на номинальное напряжение 20 кВ и выше.

**Ключевые слова:** токопроводы, литая полимерная изоляция, частичные разряды, экранирование, электрическая прочность.

The influence of partial discharges arising from gas inclusions on the short-term and long-term electrical strength of cast epoxy insulation is shown. The influence of the features of the technological process of manufacturing current pipelines on the development of these defects is revealed. The most effective ways to improve the adhesion of epoxy compounds and poured current-carrying elements are experimentally investigated and identified. The regularities of the influence of technological factors on the adhesion and autohesion of cast polymer insulation containing internal current-carrying elements in relation to their working conditions in high-voltage current pipelines are revealed. Specific technical solutions are substantiated to improve the adhesion and autohesion of epoxy compounds and to exclude gas inclusions in cast insulation, which lead to an increase in the electrical strength and reliability of high-voltage current pipelines with cast insulation. It is emphasized that such technical solutions are necessary for the development of high-voltage current pipelines with a nominal voltage of 20 kV and higher.

**Key words:** current lines, cast polymer insulation, partial discharges, shielding, electrical strength.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 36-41*

**Распределение электрического поля в токопроводах с твердой изоляцией напряжением 20 кВ**

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

Приведены результаты исследований распределения электрического поля в токопроводе напряжением 20 кВ. Предварительно установлены основные этапы расчета и определены наиболее сложные для вычислений области конструкции токопровода. Разработана математическая модель и проведен упрощенный расчет распределения потенциала и напряженности электрического поля внутри изоляционного слоя твердой изоляции токопровода. Определен характер изменения напряженности электрического поля в изоляционном слое токопровода и сделаны выводы о достаточности характеристик компаунда для практического применения.

**Ключевые слова:** токопроводы, твердая изоляция, распределение электрического поля, пробой изоляции, математическая модель.



The results of studies of the distribution of the electric field in a current line with a voltage of 20 kV are presented. The main stages of the calculation are pre-established and the most difficult areas of the current pipeline design for calculations are determined. A mathematical model is developed and a simplified calculation of the distribution of the potential and the electric field strength inside the insulating layer of the solid insulation of the current pipeline is carried out. The nature of the change in the electric field strength in the insulating layer of the current pipeline is determined and conclusions are made about the sufficiency of the characteristics of the compound for practical use.

**Key words:** current lines, solid insulation, electric field distribution, insulation breakdown, mathematical model.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 47-51*

#### **Характеристики барьерного разряда как элемента электрической цепи**

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

Представлены результаты моделирования параметров барьерного разряда совместно с параметрами источника питания, в том числе и в неидеальных условиях (неоднородность разрядного промежутка) в системах с твердым диэлектриком. Исследовано влияние параметров цепи высоковольтного питания на эффективность работы генератора озона (ГО) на основе диэлектрического барьерного разряда. Показана возможность обратного влияния параметров ГО на эффективность и режимы работы высоковольтного источника питания. Выполнено моделирование процессов в источнике питания и барьерном разряде для однородного и неоднородного промежутка. Сравнение результатов моделирования с параметрами работы реальных ГО, использующих диэлектрический барьерный разряд, показало корректность созданной модели. Рассмотрено влияние на ток и напряжение барьерного разряда неоднородности геометрических параметров разрядной ячейки. Дано объяснение наблюдающемуся на практике отличию реальной резонансной частоты озонатора от расчетной.

**Ключевые слова:** диэлектрический барьерный разряд, высоковольтный источник питания, однородный и неоднородный разрядный промежуток, моделирование.

The results of modeling the parameters of barrier discharge together with the parameters of the power supply, including under non-ideal conditions (inhomogeneity of the discharge gap) in systems with a solid dielectric, are presented. The influence of the parameters of the high-voltage power supply circuit on the efficiency of the ozone generator (OG) based on a dielectric barrier discharge is investigated. The possibility of reverse influence of the OG parameters on the efficiency and operating modes of a high-voltage power supply is shown. The processes in the power supply and the barrier discharge are modeled for a homogeneous and inhomogeneous gap. A comparison of the simulation results with the operating parameters of real OG using a dielectric barrier discharge showed the correctness of the created model. The influence of the inhomogeneity of the geometric parameters of the discharge cell on the current and voltage of the barrier discharge is considered. An explanation is given for the observed difference in practice between the real resonant frequency of the ozonator and the calculated one.

**Key words:** dielectric barrier discharge, high-voltage power supply, homogeneous and inhomogeneous discharge gap, modeling.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 52-56*

**Критические параметры электронных лавин в воздухе в сильных однородных полях**  
БЕЛОГЛОВСКИЙ А.А., БЕЛОУСОВ С.В., ГАЛИМОВА А.В., КОВАЛЕВ Д.И.

Представлена математическая модель электронных лавин и лавинно-стримерных переходов в воздухе, основанная на дрейфово-диффузионной модели разрядов и учитывает дрейф электронов в электрическом поле, ударную ионизацию молекул электронами, их прилипание и отлипание. Критерий перехода – появление квазинейтрального плазменного канала между лавиной и её следом. Дана оценка критического числа электронов и минимальной напряжённости между лавиной и её следом в момент трансформации лавины в стример в воздухе при нормальных атмосферных условиях. Изучены разряды в промежутках длиной 0,1–0,5 см с однородным полем напряжённостью  $(5-8) \cdot 10^4$  В/см. Показано, что критическое число электронов слабо зависит от значения напряженности и находится в диапазоне  $(3,9-5,5) \cdot 10^7$ . Подтверждены устойчивость применённой математической модели к изменениям её параметров и соответствие результатов расчётов известным закономерностям развития лавин и лавинно-стримерных переходов.

**Ключевые слова:** электронная лавина, стример, лавинно-стримерный переход, критические параметры электронной лавины, математическая модель.

A mathematical model of electron avalanches and avalanche-streamer transitions in air is presented, based on the drift-diffusion model of discharges and takes into account the drift of electrons in an electric field, the shock ionization of molecules by electricity, their adhesion and detachment. The transition criterion is the appearance of a quasi-neutral plasma channel between an avalanche and its wake. The critical number of electrons and the minimum tension between the avalanche and its trace at the moment of transformation of the avalanche into a streamer in the air under normal atmospheric conditions are estimated. Discharges in intervals of 0,1–0,5 cm in length with a homogeneous field of intensity  $(5–8) 10^4$  V/cm were studied. It is shown that the critical number of electrons weakly depends on the value of the voltage and is in the range  $(3,9–5,5) 10^7$ . The stability of the applied mathematical model to changes in its parameters and the correspondence of the calculation results to the known patterns of avalanche development and avalanche-streamer transitions are confirmed.

**Key words:** electronic avalanche, streamer, avalanche-streamer transition, critical parameters of an electronic avalanche, mathematical model.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 57-61*

**Влияние неравномерности разрядного промежутка на энергетические характеристики барьерного генератора озона**

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

Представлены результаты моделирования работы барьерных генераторов озона (ГО) с учетом неидеальности их конструкции. Описано влияние неоднородности разрядного промежутка на основные мощностные характеристики работы барьерных ГО. На примере вольт-кулонных характеристик, непосредственного интегрирования мгновенных значений тока через ГО и напряжения на его электродах, а также использования известных расчетных выражений показано существенное влияние неоднородности газового зазора на снижение уровня энергии барьерного разряда. Дано объяснение S-образной формы вольт-амперных характеристик барьерных ГО, показано влияние неоднородности зазора на внешний вид характеристик. На основании проведенных расчетов показано отсутствие влияния неравномерности зазора на отношение

амплитудного и действующего значения тока и напряжения при существенном изменении характера самих осциллограмм. Сделано предположение о влиянии переменного коэффициента мощности на корректность нахождения значения энергии разряда.

**Ключевые слова:** генератор озона, диэлектрический барьерный разряд, активная мощность, вольт-амперная характеристика, вольт-кулонная характеристика, моделирование.

The results of modeling the operation of barrier ozone generators (GO), taking into account the imperfection of their design, are presented. The influence of the inhomogeneity of the discharge gap on the main power characteristics of the barrier systems is described. Using the example of volt-coulomb characteristics, direct integration of instantaneous values of the current through the GO and the voltage at its electrodes, as well as the use of known calculation expressions, a significant effect of the inhomogeneity of the gas gap on reducing the energy level of the barrier discharge is shown. An explanation of the S-shape of the volt-ampere characteristics of the barrier structures is given, the effect of the gap inhomogeneity on the appearance of the characteristics is shown. Based on the calculations performed, it is shown that there is no effect of the gap unevenness on the ratio of the amplitude and effective values of current and voltage with a significant change in the nature of the waveforms themselves. An assumption is made about the influence of the variable power factor on the correctness of finding the value of the discharge energy.

**Key words:** ozone generator, dielectric barrier discharge, active power, volt-ampere characteristic, volt-coulomb characteristic, modeling.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 62-68*

### **Оценка надежности работы электрооборудования при наличии высших гармоник токов и напряжений**

СУЛТАНОВ М.М., ЗЕНИНА Е.Г., КУЛЬКОВ В.Г., СТРИЖИЧЕНКО А.В., ЖЕЛЯСКОВА О.И.

Рассмотрено влияние гармонических составляющих напряжения и тока на надежность работы электрооборудования электростанций и подстанций. Проанализированы дополнительные потери, возникающие в элементах электрооборудования из-за вихревых токов, перемангничивания, скин-эффекта. Выявлены зависимости дополнительных потерь энергии от уровней токов и частоты для гармонических составляющих сигнала.

Проведена оценка дополнительных потерь и увеличения скорости износа изоляции на

примере силового трансформатора распределительных сетей, постоянно работающего на нагрузку с широким диапазоном высокочастотных составляющих напряжения и тока.

**Ключевые слова:** электрооборудование, надежность, потери в обмотках, потери в магнитопроводе, несинусоидальность, скин-эффект.

The influence of harmonic components of voltage and current on the reliability of electrical equipment of power plants and substations is considered. The additional losses that occur in the elements of electrical equipment due to eddy currents, magnetization reversal, and the skin effect are analyzed. The dependences of additional energy losses on the current levels and frequency for the harmonic components of the signal are revealed. An assessment of additional losses and an increase in the rate of insulation wear is carried out on the example of a power transformer of distribution networks that constantly operates on a load with a wide range of high-frequency components of voltage and current.

**Key words:** electrical equipment, reliability, losses in windings, losses in the magnetic circuit, non-sinusoidality, skin effect.

*Электротехника, 2021, №8, стр. 72-72*

**Феликс Нигматзянович Шакирзянов**

(К 80-летию со дня рождения)

*Электротехника, 2021, №8, стр. 73-74*

**Авторы номера**