

20. Bondarenko R.P., Chernov N.N., Kirichenko I.I., Kirichenko I.A. Primenenie korrelyatsionnykh grafov dlya analiza rezul'tatov diagnostiki narusheniy slukha metodami audiometrii [The use of correlation graphs to analyze the results of diagnostics of hearing impairment audiometry methods], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 4 (189), pp. 254-261.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

Кириченко Инна Игоревна – Южный Федеральный университет; e-mail: ikirichenko@sfedu.ru; г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. Е; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

Kirichenko Inna Igorevna – Southern Federal University; e-mail: ikirichenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, build. E, Taganrog, GSP 17A, Russia; the department of acoustics and medical technology; graduate student.

УДК 620.192.4

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-179-189

М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЫЗВАННЫХ ЧАСТИЧНЫМИ РАЗРЯДАМИ*

Проведено теоретическое обоснование процессов и механизмов электрического пробоя в изоляционных материалах. Предложена математическая модель количественных и интегральных характеристик частичных разрядов (ЧР) в изоляционных материалах, а также прогнозирование появления включения. На основании расчета характеристик ЧР, установлена связь изменения напряжения зажигания ЧР U_x и кажущегося заряда q от размера дефекта в изоляции, а также изменения напряжения зажигания ЧР U_x и кажущегося заряда q от диэлектрической проницаемости изоляции ϵ . Напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений, а кажущаяся амплитуда ЧР – их разрядную площадь, то есть все геометрические характеристики включений становятся известными. Анализ результатов показал, что измерение параметров ЧР позволяет в комплексе оценивать воздействие на изоляционные материалы различных факторов и определять степень её деградации. ЧР являются мерой степени электрического старения, и интенсивности внешних воздействий механических, температурных и др., оказывают существенное влияние на формирование и развитие дефектов изоляции. Показано, что напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений в изоляционном материале, а кажущаяся амплитуда ЧР - их разрядную площадь на основании. Разработан комплексный подход диагностики силовых кабельных линий (СКЛ) и алгоритм исследований возникновения и развития пробоя, при котором математические модели позволяют определять геометрические характеристики включений и дать количественную оценку остаточного ресурса СКЛ. Предложены критерии (напряжение возникновения частичных разрядов, уровень частичных разрядов, коэффициент старения; коэффициент нелинейности) позволяющие определять и прогнозировать остаточный ресурса – интервал времени развития скрытых дефектов.

Метод диагностики; прогнозирование; тепловой пробой; изоляционные материалы; частичные разряды.

* Работа выполнена при поддержке гранта: Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии, № ВнГр-07/2017-15.

M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich

METHOD OF DIAGNOSTICS AND FORECASTING OF THE THERMAL BREAKDOWN IN INSULATING MATERIALS CAUSED BY PARTIAL DISCHARGES

Theoretical justification of the processes and mechanism of electric breakdown in insulating materials is given. The proposed mathematical model and quantitative integral characteristics of partial discharges (PD) in insulating materials and prediction of the appearance of inclusion is shown. On the basis of the calculation of the characteristics of the CR, the connection between the change of the ignition voltage of the CR U_x and the apparent charge q the size of the defect in insulation, as well as changes in the ignition voltage of the CR U_x and the apparent charge q by the dielectric constant ϵ of the insulation are provided. The ignition voltage allows determining the thickness of the inclusions, and the apparent amplitude of the Czech Republic, their bit area, that is, all geometric features of the inclusions are known. Analysis of the results showed that the measurement parameters of the CR allows the complex to assess the impact on the insulation materials of different factors and determine the degree of degradation. CHR is a measure of the degree of electrical aging and intensity of external influences mechanical, thermal, etc., has a significant impact on the formation and development of defects of isolation. It is shown that the ignition voltage allows determining the thickness of the inclusions in the insulation material, and the apparent amplitude of the CR determines their discharge square on the base. Developed is an integrated approach for diagnostics of power cable lines (CLA) and the algorithm of studying the emergence and development of breakdown in which mathematical models allow determining the geometrical characteristics of inclusions and quantifying the residual re-SORS SKL. Proposed criteria (voltage occurrence of partial discharges, partial discharges, ageing coefficient; the non-linearity coefficient) allow determining and predicting the residual resource-interval of time for the latent defects development.

Diagnostic method; forecasting; thermal breakdown; insulating materials; partial discharges.

Введение. В процессе эксплуатации, сложных распределительных систем, изоляционные материалы подвергаются различным воздействиям, под влиянием которых происходит деструкция изоляции – необратимое ухудшение ее физико-химических характеристик. В результате воздействующих факторов (тепловое, электрическое, механическое, а также воздействие окружающей среды [1]) или в процессе изготовления в диэлектрике появляются неоднородности, газовые или воздушные включения [2–6]. Последовательность и взаимосвязь процессов, приводящих к старению и пробой изоляции, можно представить следующей схемой, рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм процесса старения и пробоя изоляции

Тепловой пробой связан с разогревом диэлектрика при протекании тока проводимости и развития диэлектрических потерь. Формирование теплового пробоя [7] в основных чертах описывается и проходит по следующему алгоритму, рис. 2, где U_B – напряжение на включении, I_B – ток протекающий на включении, T_B – температура во включении, γ – проводимость изоляции, $\text{tg}\delta$ – тангенс диэлектрических потерь, P_B – выделяемая мощность во включении, W_B – выделяемая энергия на включении, Q_B – теплота выделяющаяся во включении.

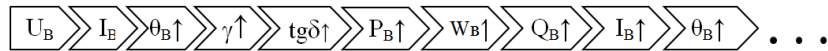


Рис. 2. Процесс теплового пробоя

Закономерности процесса развития ЧР и старения изоляции. Для выявления закономерностей развития ЧР в газовых включениях, определены характеристики ЧР [5], участвующие в разрушении изоляционных материалов, рис. 3, где C_B – ёмкость газового включения, $C_{П,1}-C_{П,n}$ – ёмкость изоляции включенной последовательно с газовым включением, r_B – сопротивление канала в газовом включении, $C_{и}$ – ёмкость остальной части изоляции, R_a – сопротивление абсорбции, $R_{пр}$ – сопротивление проводимости.

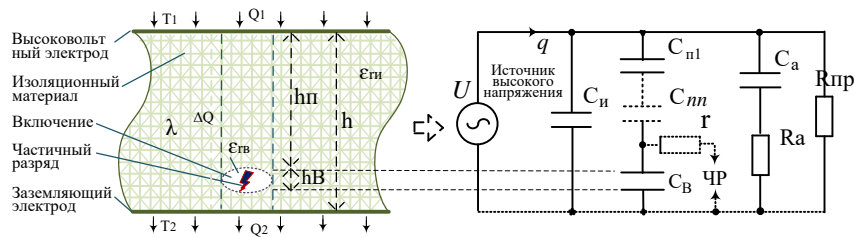


Рис. 3. Схема развития ЧР в газовых включениях изоляции: а – исследуемый изоляционный материал; б – эквивалентная электрическая схема замещения в момент возникновения ЧР во включении

При приложении к изоляционному материалу напряжения (рис. 3) $U=U_m \sin \omega t$, напряжение на включении, U_B будет равно: $U_B = U \cdot C_{П} / (C_B + C_{П})$. Когда напряжение на включении достигнет напряжения начальной ионизации газа, с учетом, что толщина включения h_B , много меньше диэлектрической толщины h ($h_B \ll h$) и неоднородности электрического поля изоляции, произойдет частичный разряд емкости включения

$$U_{ЧР} = U_{в,пр} \epsilon_{r,и} h / \delta K_H \epsilon_{r,в} \sqrt{2}, \quad (1)$$

где $K_H = E_{\max} / E_{ср}$ – коэффициент неоднородности электрического поля в изоляции, равный отношению максимальной напряженности E_{\max} к средней напряженности $E_{ср}$ в изоляционном промежутке $\epsilon_{r,и}$ – диэлектрическая проницаемость изолирующего материала, тогда напряжение на включении:

$$U_B = U \epsilon_{r,т.в.} \cdot h_B / h, \quad (2)$$

где $\epsilon_{r,т.в.}$ – относительная диэлектрическая проницаемость изоляционных твердых веществ.

С увеличением напряжения, приложенного к изоляции, темпы электрического старения возрастают, а срок службы τ соответственно уменьшается [7]. Зависимость срока службы τ от значения воздействующего напряжения U

$$\tau = A/(U - U_{\text{чр}})^n, \quad (3)$$

где $n = 4-8$ при напряжении промышленной частоты и $n = 9... 12$ при постоянном напряжении, $U_{\text{чр}}$ – напряжение появления в изоляции частичных разрядов, являющихся основной причиной электрического старения внутренней изоляции.

Рост прикладываемого напряжения ведет к линейному росту уровня ЧР а также к понижению порога их возникновения. При определенном напряжении $U_{\text{кр}}$ – напряжение критических ЧР – интенсивность ЧР резко возрастает (например, вследствие образования дендрита, образование пузырьков газа), что приводит к резкому разрушению изоляции и снижению срока службы [8–10].

Число разрядов во включении за 1с:

$$N_{\text{чр}} = 2f \frac{2(U_{\text{мв}} - U_{\text{в.г}})}{\Delta U_{\text{в}}}, \quad (4)$$

где $U_{\text{в.г}}$ – напряжения гашения, $U_{\text{м}}$ – приложенного напряжения, $\Delta U_{\text{в}}$ – падение напряжения на части изоляции с включением, приложенное напряжение на включении $U_{\text{мв}} = U_{\text{м}} \frac{C_{\text{п}}}{C_{\text{п}} + C_{\text{в}}} = U_{\text{м}} C_{\text{э}}$. Длительность процесса пробоя на включении (длительность ЧР) зависит от размера включения [11].

При $U \geq U_{\text{чр}}$ в газовых включениях возникают и гаснут ЧР и в его канале рассеивается энергия $W_{\text{чр}}$, часть которой идет на разрушение изоляции. Средняя мощность ЧР в одном включении определяется [8].

$$P_{\text{чр}} = \eta_{\text{чр}} W_{\text{чр}} = 2f(C_{\text{п}} + C_{\text{в}})(U_{\text{вз}} + U_{\text{вп}})(U_{\text{вм}} - U_{\text{вп}}), \quad (5)$$

где $P_{\text{чр}}$ – мощность ЧР на включении, $U_{\text{вз}}$ – напряжение зажигания.

За время протекания тока частичного разряда нейтрализуется заряд включения $q = \Delta U_{\text{в}} C_{\text{в.экв}}$, при этом ток разряда

$$i_{\text{в}} = dq_{\text{в}}/dt = C_{\text{в.экв}}(d(\Delta U_{\text{в}}))/dt = \left(\frac{\Delta U_{\text{в}}}{RC_{\text{в.экв}}}\right)e^{-\beta t}, \quad (6)$$

где $\Delta U_{\text{в}}$ – падение напряжения на дефектной части изоляции, $\beta = 1/RC_{\text{в.экв}}$.

$$C_{\text{в.экв}} = C_{\text{и}} + (C_{\text{в}}C_{\text{п}})/(C_{\text{в}} + C_{\text{п}}).$$

Таким образом, из выражений (4) и (5) следует, что с ростом U число ЧР в единицу времени и мощность увеличивается, соответственно скорость электрического старения изоляции возрастает, а срок службы сокращается.

Диагностические характеристики изоляционных материалов. Каждый из единичных ЧР сопровождается прохождением через включение определённого заряда q и приводит к изменению напряжения на внешних электродах всего образца на $\Delta U_{\text{п}}$ [8]. Если $C_{\text{и}} \gg C_{\text{п}}$, а $C_{\text{в}} \gg C_{\text{п}}$, то $C_{\text{э}} \approx C_{\text{в}}$, и заряд q проходящий через включение, при котором появляется и гаснет ЧР, равен $q = (C_{\text{в}} + C_{\text{п}})(U_{\text{в.пр}} - U_{\text{в.г}}) = (C_{\text{в}} + C_{\text{п}})\Delta U_{\text{п}}$, где $U_{\text{в.пр}} - U_{\text{в.г}} = \Delta U_{\text{в}}$.

Если включение имеет форму прослойки, вытянутой поперек силовых линий поля, то удобно относить емкости $C_{\text{п}}$ и $C_{\text{в}}$ к единице поверхности включения. Тогда соотношение между кажущимся зарядом ЧР $q_{\text{чр}}$ и практическим зарядом q может быть представлена в следующем виде:

$$q_{\text{чр}} = q \frac{\varepsilon_{\text{п}}}{h - h_{\text{в}}} / \left(\frac{\varepsilon_{\text{п}}}{h - h_{\text{в}}} + \frac{\varepsilon_{\text{в}}}{h_{\text{п}}} \right) = q / \left(1 + \frac{\varepsilon_{\text{п}}}{\varepsilon_{\text{д}}} \left(\frac{h}{h_{\text{в}}} - 1 \right) \right). \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что кажущийся заряд ЧР уменьшается с увеличением толщины диэлектрика h . С ростом напряжения количество включений, в которых возникают ЧР увеличивается, что приводит к более сильной зависимости числа разрядов в секунду и мощности ЧР от напряжения. Основную информацию об источнике ЧР несут кажущийся заряд и частота следования импульсов ЧР. Практическая мощность ЧР разряда $P_{\text{ЧР}}$ равна:

$$P_{\text{ЧР}} = \sum_{i=1}^k (W_{\text{ЧР}(i+1)} + W_{\text{ЧР}i})(\eta_{i+1} - \eta_i)/2,$$

где $W_{\text{ЧР}i}$ – i -й уровень энергии, $\eta_i = U_{\text{в.г}} / U_{\text{в.пр.}} = 0,5-0,8$

Мощность ЧР зависит интенсивности ЧР (количество разрядов за период питающего напряжения) зависит от размера газового включения.

Потери энергии на частичные разряды. Энергия ЧР $W_{\text{ЧР}}$ прикладывается к небольшому участку изоляционного материала – концентрировано, за очень короткий интервал времени, что приводит к разрушению микрообъемов изоляционного материала прилегающего к газовому включению. С течением времени размеры включения увеличиваются в направлении электрического поля, процесс завершается полным пробоем изоляции. Эта энергия частично тратится на разогрев испытуемого объекта, а частично расходуется на разрушение изоляционного материала.

$$W_{\text{ЧР}} = q_{\text{ЧР}} U_{\text{ЧР}}(1 + \eta) / \sqrt{2}.$$

Из изложенного выше материала можно сделать предварительный вывод:

1. Что методами обнаружения термофлуктуационных процессов при ЧР во включении может быть:

- ◆ измерение тока (всплеска i_B) во внешней цепи $I_{\text{ТНП}}$ [9];
- ◆ измерение возможных пульсаций напряжения на измеряемом объекте U_O ;
- ◆ измерение температуры в поперечном сечении кабеля θ .

2. Мощность ЧР зависит от размера включения. Увеличение размера включения (а именно увеличения пробивного промежутка h_B) является увеличением начального напряжения ионизации, следовательно, импульс тока и напряжения будет иметь большую амплитуду, а мощность ЧР возрастет (5). Увеличение мощности разряда приведет к интенсивному росту включения по направлению к электродам, что в последствии приведет к полному пробоем изоляции. Интенсивность ЧР в случае газового включения с большими размерами будет меньше, но при этом его мощность (амплитуда) будет больше. Анализируя мощность импульса ЧР, по количеству выделенного тепла (температуре СКЛ), можно говорить о степени развития дефекта в изоляции [11, 22].

3. Если происходит общее изменение структуры изоляционного материала. Например изменение химической структуры, связанное с увеличением $\text{tg}\delta$, с возможностью развития теплового пробоя, то необходимо иметь ввиду прежде всего мощность ЧР.

Тепловыделение в электрической изоляции. При повышенных температурах, когда условия теплоотвода затруднены и может нарушаться условие теплового равновесия между выделенным и отведенным количеством тепла может развиваться тепловой пробой. Количество выделяемого в диэлектрике тепла пропорционально диэлектрическим потерям, т.е.

$$Q_{\text{выд}} = U^2 \cdot \omega \cdot C_B \cdot \text{tg}\delta_t, \text{ где } \text{tg}\delta_t = \text{tg}\delta_0 e^{a(\theta - \theta_0)}. \quad (8)$$

При определении температуроперепадов исходим из теплового закона Ома [20]:

$$Q = \Delta\theta / R; \quad R = \Delta / \lambda \cdot S. \quad (9)$$

Здесь R – тепловое сопротивление; λ – коэффициент теплопроводности; S – поверхность охлаждения; Δ – толщина диэлектрика; ΔT – перепад температуры.

Согласно уравнения Фурье для теплового потока

$$\Delta Q = \lambda \cdot d\theta/dx. \quad (10)$$

При конвективном теплообмене:

$$Q = \alpha_k \cdot S_{\text{п.о.}} \cdot (\theta_{\text{пв}} - \theta_0). \quad (11)$$

Здесь α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией; $S_{\text{п.о.}}$ – рассеивающая поверхность охлаждения; $\theta_{\text{пв}}$ – температура поверхности изделия.

Зная количество выделяемого СКЛ тепла, можем определить температуру на жиле кабеля. Тепловыделение в слоях изоляции [21, 22, 23]

$$Q_{oi} = \Delta U_{i,\text{раб}}^2 \omega C_i \text{tg} \delta_i / l_i,$$

где ω – угловая частота ($\omega=2\pi f$); $C_i = \epsilon \epsilon_0 S_i / h_i$ – емкость слоя, l_i – длина изоляционного материала, $\text{tg} \delta_i$ – значение $\text{tg} \delta$ с учетом типа изоляции

$$\theta_{\text{ж}} = \theta_{\text{пв}} + n \cdot I^2 \cdot \rho_{20} \cdot T_k K_p (1 + \alpha_k \cdot Q / \alpha \cdot S) / S. \quad (12)$$

где $\theta_{\text{ж}}$ – расчетная температура жилы кабеля, °С; $\theta_{\text{пв}} = 23$ °С – измеренная температура поверхности кабеля; $n=1$ – число жил кабеля; I – максимальный ток кабеля при проведении измерений, А; $\rho_{20} = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельное электрическое сопротивление жилы кабеля при 20 °С; $T_k = 0,0028$ °С – м/Вт – сумма термических сопротивлений изоляции и защитных покровов кабеля; $K = 1,02$ – поправочный коэффициент для приведения электрического сопротивления к расчетной температуре (при прокладке в воздухе – 1,02; в земле – 0,98); $\alpha = 0,004308$ 1/°С – температурный коэффициент сопротивления материала жилы [9, 10]; $\theta_{\text{доп}} = 90$ °С – длительно допустимая температура изоляции жилы; $\theta_{\text{окр}} = 23$ °С – измеренная температура окружающей среды; $S = 0,0038465$ – сечение жилы кабеля, м²; γ – удельная теплопроводность; R – тепловое сопротивление; C – теплоемкости изоляции (жилы).

Таким образом: Для регистрации термофлуктуационных процессов в изоляционных материалах, выделяемое количество тепла Q , в результате ЧР, будем оценивать с помощью пропорциональной ей величине через температуру на жиле (12). Критериями оценки работоспособности кабелей по данному методу являются: напряжение возникновения частичных разрядов ($U_{\text{воз}}$), уровень частичных разрядов (Q), коэффициент старения (P), коэффициент нелинейности (Q_S) а также частота и их интенсивность.

Таким образом, получена математическая модель развития ЧР и формирования теплового пробоя

$$\begin{cases} U_{\text{чр}} = U_{\text{в.пр}} \epsilon_{\text{п}} h / \delta K_{\text{н}} \epsilon_{\text{в}} \sqrt{2} \\ U_{\text{в}} = U \epsilon_{\text{п}} \cdot h_{\text{в}} / h \\ i_{\text{в}} = U \epsilon_{\text{п}} \cdot h_{\text{в}} / h \\ q_{\text{чр}} = q / \left(1 + \frac{\epsilon_{\text{в}}}{\epsilon_{\text{п}}} \left(1 - \frac{h_{\text{в}}}{h} \right) \right) \\ W_{\text{чр}} = q_{\text{чр}} U_{\text{чр}} (1 + \eta) / \sqrt{2} \\ Q_{oi} = \Delta U_{i,\text{раб}}^2 \omega C_i \text{tg} \delta_i / l_i \end{cases}$$

Методика оценки технического состояния СКЛ. Эксперимент проводился аппаратурой OWTS по всем фазам силовой кабельной линии (СКЛ) длиной 590 м [14, 16, 17], которая находилась под напряжением 6 кВ с 1983 года. Исследовался 3-жильный кабель типа ААБ 3*150. СКЛ состоящий из пяти секций, соединенных между собой муфтами. Распределение основной характеристики ЧР (интенсивности ЧР), представлено на карте, рис. 4.

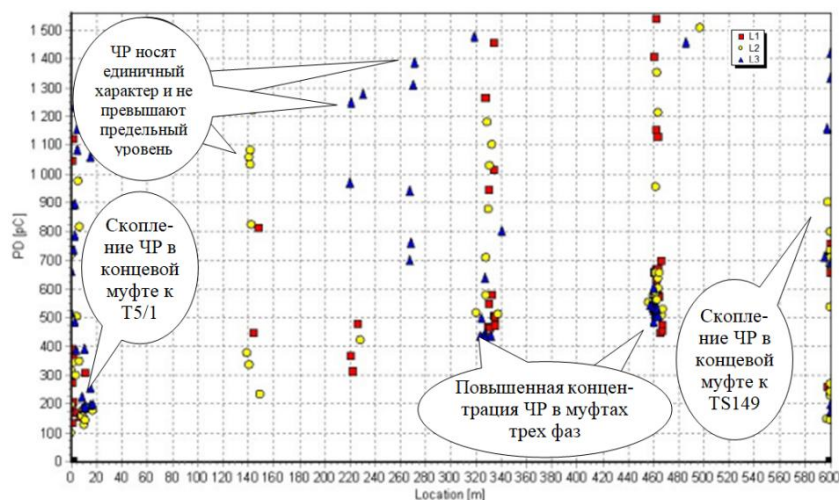


Рис. 4. Карта распределения и интенсивности ЧР в изоляции СКЛ

Исследование показало, что на отметке 332м, 460м, по всем фазам (L1, L2, L3), и концевым заделкам с обеих сторон зафиксирована повышенная интенсивность ЧР. Периодический нагрев и охлаждение кабелей [12, 13], приводит к снижению величины емкости жилы кабеля по отношению к оболочке и другим жилам. Результаты исследований силовой кабельной системы (напряжения возникновения частичных разрядов [20], $U_{воз}$; максимальной величины (уровня) ЧР q , сведены в табл. 1.

Таблица 1

Исследование диэлектрических параметров состояния СКЛ

Кабельная система	Параметры диэлектрического старения ($I_{раб}$, $U_{воз}$)		Рекомендации по техническому обслуживанию			
	P	QS	Степень увлажнения	Степень Старения изоляции	Состояние	Диагностирование
РП-1 до ТП-149	0.279	1.172	Влажная	Сильно состарена	Неуд.	Через 1-год
ТП-173 до ТП-174	0,18	1,704	Влажная	Сильно состарена	Неуд.	Через 1-год
ТП-36 до ТП-6	0.214	1,715	Влажная	Средняя	Удовл.	Через 5-лет
ТП-149 до ТП-36	0,164	1,733	Высокая влажность	Высокая влажность	Неуд.	Через 1-год
ТП-36 до ТП-905	0.934	1,377	Оч. высокая (сырая)	Сильно состарена	Предпробойное	В теч. 1-мес.

где P – коэффициент старения; Q_S – коэффициент нелинейности.

Как следует из табл. 1 исправная изоляция имеет значение максимального кажущегося заряда намного меньшей величины установленной стандартом [18]. Таким образом, взаимосвязь характеристик ЧР с состоянием электрической изоляции не вызывает сомнений.

На основании исследований и измерений разработана методика оценки технического состояния КЛ по результатам диагностического обследования щадящими и неразрушающими методами с определёнными критериями оценки. Основываясь на параметрах ЧР (напряжение возникновения ЧР, $U_{\text{ВОЗ}}$; максимальной величины ЧР, $q_{\text{ЧР}}$, новым является возможность определения величины дефектной области. При этом предполагается, что падение напряжения на воздушном включении толщиной $h_{\text{в}} < h$ (толщина изоляции) составляет

$$U_{\text{в}} = U \varepsilon h_{\text{в}} / (h + (\varepsilon - 1)h_{\text{в}}). \quad (13)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Если падение напряжения на включении достигнет пробивного напряжения воздуха $U_{\text{в.пр.}}(h_{\text{в}})$ в соответствии с эмпирическим законом Пашена, то воздушное включение пробьётся. Точки пересечения кривых $U_{\text{в}}(h_{\text{в}})$ и $U_{\text{в.пр.}}(h_{\text{в}})$ определяют диапазон размеров включений от $h_{\text{в1}}$ до $h_{\text{в2}}$, в которых вспыхивают ЧР. По мере увеличения напряжения ЧР охватывают все больший диапазон размеров включений. При этом суммарная частота ЧР увеличивается как за счет роста частоты ЧР в «старых» включениях, активизированных на предыдущих ступенях испытательного напряжения, так и за счет «новых» включений, активизированных при очередном подъеме напряжения. Наблюдая за ростом частоты ЧР при подъеме напряжения, можно оценить количество «новых» включений. Между кажущейся амплитудой ЧР во включении и его разрядной площадью существует функциональная связь

$$q = U_{\text{в.пр.}} \varepsilon \varepsilon_0 S_{\text{в}} / (h - h_{\text{в}}). \quad (14)$$

Следовательно, напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений в соответствии с (13), а кажущаяся амплитуда ЧР – их разрядную площадь на основании (14). Таким образом, все геометрические характеристики включений становятся известными. От степени их выполнения в каждом конкретном случае зависит правильность определения геометрических размеров.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что разработка неразрушающего метода диагностики кабелей является перспективной задачей, которая позволяет увеличить надежность электроснабжения потребителей решая основную задачу энергоснабжающих организаций. Использовался комплексный подход при диагностике СКЛ, выработан алгоритм исследований возникновения и развития пробоя, при котором математические модели позволяют дать количественную оценку остаточного ресурса кабелей. С помощью данных критериев (напряжение возникновения частичных разрядов, уровень частичных разрядов, коэффициент старения; коэффициент нелинейности) стало возможным быстро и детально определять и достаточно точно прогнозировать, развитие выявленных скрытых дефектов до пробоя, табл. 1, 2. Если принять, что включение имеет форму эллипса ($S = \pi \cdot a \cdot b$) а в классической форме b соотносится к a ($b = 0,5a$), тогда выражение 14, можно записать в виде: $q = 2U_{\text{в.пр.}} \varepsilon \varepsilon_0 \pi b^2 / (h - 2b)$.

Тогда для нахождения размера включения необходимо решить квадратное уравнение: $2U_{\text{в.пр.}} \varepsilon \varepsilon_0 \pi b^2 + 2bq - qh = 0$

Таблица 2

Исследование параметров ЧР и состояния изоляции СКЛ

Кабельная система	Параметры ЧР		Размер включения d_b , мм	Рекомендации	
	$U_{в.пр.}$, кВ	Q , пКл		Состояние изоляции	Ремонт в течении
РП-1 до ТП-149	4,0	1540	1,375	Неуд	1-го года
ТП-173 до ТП-174	4,0	4730	1,375	Неуд	1-го года
ТП-36 до ТП-6	6,0	1162	0,99	Неуд	1-го года
ТП-149 до ТП-36	6,0	972	0,9	Неуд	1-го года
ТП-36 до ТП-905	2,0	12174	1	Предпробойное	1-го месяца

где $U_{в.пр.}$ – напряжение возникновения частичных разрядов (PDIV); Q – пКл максимальная величина (уровень) ЧР, при U_0 .

Заключение

1. Проведено теоретическое обоснование процессов и механизмов электрического пробоя в изоляционных материалах. Предложена математическая модель количественных и интегральных характеристик ЧР в изоляционных материалах, а также прогнозирование появления включения.
2. На основании расчета характеристик ЧР, установлена связь изменения напряжения зажигания ЧР U_x и кажущегося заряда q от размера дефекта в изоляции, а также изменения напряжения зажигания ЧР U_x и кажущегося заряда q от диэлектрической проницаемости изоляции ϵ .
3. Анализ результатов показал, что измерение параметров ЧР позволяет в комплексе оценивать воздействие на изоляционные материалы различных факторов и определять степень её деградации. ЧР являются мерой степени электрического старения, и интенсивности внешних воздействий механических, температурных и др., оказывают существенное влияние на формирование и развитие дефектов изоляции.
4. Следовательно, напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений в соответствии с (13), а кажущаяся амплитуда ЧР – их разрядную площадь на основании (14). Таким образом, все геометрические характеристики включений становятся известными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
2. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1979. – 224 с.
3. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 128 с.
4. Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 152 с.
5. Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 256 с.
6. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1980. – 112 с.
7. Важнов В.Ф., Лавринович В.А. Техника высоких напряжений: курс лекций. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.
8. Дубяго М.Н. Исследование характеристик частичных разрядов в электрической изоляции систем электроснабжения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 201-207.

9. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* The Method of Nondestructive Testing and Prediction of Evolving Insulation Defect of Power Line Cable // International SAUM Conference on systems, Automatic Control and Measurements (10;2012;Nis): Proceedings / XI Triennial November 14-16. – P. 418-422.
10. *Dubyago M.N.* Mathematical description of interaction of the elements in the power network system // 2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2013), Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 448-453. – P. 2455-2460.
11. *Бунзя А.А.* Разработка трехмерной имитационной модели высоковольтной изоляции с множеством дефектов // Транспорт Урала. – 2009. – № 4 (23). – С. 89-92.
12. *Полуянович Н.К.* Силовая электроника. – Таганрог. Изд-во ТРТУ, 2005. – 209 с.
13. *Полуянович Н.К.* Энергетическая электроника. Пособие по решению задач и методические указания. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. – 86 с.
14. *Полуянович Н.К.* Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий: учеб. пособие. – СПб., 2012. – 400 с.
15. *Полуянович Н.К.* Методы автоматизации синтеза нелинейных резистивных цепей: учеб. пособие. – Таганрог, 1999.
16. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Щуровский В.А.* Методы испытания силового электрооборудования: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 136 с.
17. *Polujanovich N.K., Rassoha D.P., Formanjuk V.S.* The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development. Development of algorithm of system of automatic diagnosing of defects of electric isolation // International SAUM Conference on systems, Automatic Control and Measurements (10;2010;Nis): Proceedings / X Triennial November 10-12. – P. 265-269.
18. ГОСТ 2007483. Метод измерения характеристик частичных разрядов. – М., 1983.
19. *Polujanovich N.K., Dubyago M.N.* Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system // 2013 4th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering (ICAMME 2013), October 11-12, 2013, Singapore, Applied Mechanics and Materials. – Vol. 459 Trans Tech Publications, Switzerland (2014). – P. 70-75.
20. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследовании изоляции кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 200-205.
21. *Меркулов В.И.* Математическое моделирование в электронизионных конструкциях: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 156 с.

REFERENCES

1. *Ushakov V.Ya.* Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya [Insulation of high-voltage]. Moscow: Energoavtomizdat, 1994, 496 p.
2. *Kuchinskiy G.S.* Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruksiyakh [Partial discharges in high-voltage designs]. Leningrad: Energiya, Leningradskoe otделение, 1979, 224 p.
3. *Svi P.M.* Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya [Methods and means of diagnostics of high voltage equipment]. Moscow: Energoatomizdat, 1992, 128 p.
4. *Ushakov V.Ya.* Elektricheskoe starenie i resurs monolitnoy polimernoy izolyatsii [Electrical aging and resource monolithic polymeric insulation]. Moscow: Energoatomizdat, 1988, 152 p.
5. *Kulakovskiy V.B.* Rabota izolyatsii v generatorakh [Insulation of high-voltage]. Moscow: Energoizdat, 1981, 256 p.
6. *Svi P.M.* Kontrol' izolyatsii oborudovaniya vysokogo napryazheniya [Insulation monitoring of high voltage equipment]. Moscow: Energiya, 1980, 112 p.
7. *Vazhnov V.F., Lavrinovich V.A.* Tekhnika vysokikh napryazheniy: kurs lektsiy [High-voltage: a course of lectures]. Tomsk: Izd-vo TPU, 2008, 150 p.
8. *Dubyago M.N.* Issledovanie kharakteristik chastichnykh razryadov v elektricheskoy izolyatsii sistem elektrosnabzheniya [Study of characteristics of partial discharge in electrical insulation of power systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 201-207.

9. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* The Method of Nondestructive Testing and Prediction of Evolving Insulation Defect of Power Line Cable, *International SAUM Conference on systems, Automatic Control and Measurements (10;2012;Nis): Proceedings / XI Triennial November 14-16*, pp. 418-422.
10. *Dubyago M.N.* Mathematical description of interaction of the elements in the power network system, *2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2013), Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 448-453, pp. 2455-2460.
11. *Bunzya A.A.* Razrabotka trekhmernoy imitatsionnoy modeli vysokovol'noy izolyatsii s mnozhestvom defektov [Development of three-dimensional simulation model of high voltage insulation with many defects], *Transport Urala* [Transport of Ural], 2009, No. 4 (23), pp. 89-92.
12. *Poluyanovich N.K.* Silovaya elektronika [Power electronics]. Taganrog. Izd-vo TRTU, 2005, 209 p.
13. *Poluyanovich N.K.* Energeticheskaya elektronika. Posobie po resheniyu zadach i metodicheskie ukazaniya [Energy electronics. Handbook on problem solving and guidance]. Taganrog: Iz-vo TRTU, 2001, 86 p.
14. *Poluyanovich N.K.* Montazh, naladka, ekspluatatsiya i remont sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy: ucheb. posobie [Installation, commissioning, operation and maintenance of power supply systems of industrial enterprises: textbook]. Saint Petersburg, 2012, 400 p.
15. *Poluyanovich N.K.* Metody avtomatizatsii sinteza nelineynykh rezistivnykh tsepey: ucheb. posobie [Methods of automated synthesis of nonlinear resistive circuits: a tutorial]. Taganrog, 1999.
16. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Shchurovskiy V.A.* Metody ispytaniya silovogo elektrooborudovaniya: ucheb. posobie [Test methods of power electric equipment: training manual]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 136 p.
17. *Polujanovich N.K., Rassoha D.P., Formanjuk V.S.* The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development. Development of algorithm of system of automatic diagnosing of defects of electric isolation, *International SAUM Conference on systems, Automatic Control and Measurements (10;2010;Nis): Proceedings / X Triennial November 10-12*, pp. 265-269.
18. GOST 2007483. Metod izmereniya kharakteristik chastichnykh razryadov [Method of measuring the characteristics of partial discharges]. Moscow, 1983.
19. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system, *2013 4th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering (ICAMME 2013), October 11-12, 2013, Singapore, Applied Mechanics and Materials*, Vol. 459 Trans Tech Publications, Switzerland (2014), pp. 70-75.
20. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Metod amplitudnogo i fazovogo raspredeleniya impul'sov chastichnykh razryadov v zadachakh issledovanii izolyatsii kabel'nykh liniy [The method of amplitude and phase distribution of partial discharge pulses in the tasks in the study of isolation of cable lines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 200-205.
21. *Merkulov V.I.* Matematicheskoe modelirovanie v elektroizolyatsionnykh konstruktsiyakh: ucheb. posobie [Mathematical modeling in insulating structures: a tutorial]. Tomsk: Izd-vo TPU, 2001, 156 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. профессор А.А. Лаврентьев.

Дубяго Марина Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: w_m88@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 89508519304; кафедра электротехники и мехатроники.

Полюянович Николай Константинович – e-mail: nik1-58@mail.ru; тел.: 89508609983; кафедра электротехники и мехатроники.

Dubyago Marina Nikolaevna – Southern Federal University; e-mail: w_m88@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79508519304; the department of electric technics and mechatronics.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – e-mail: nik1-58@mail.ru; phone: +79508609983; the department of electric technics and mechatronics.