



УДК 620.192.4

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ЧР И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.Н. Дубяго, w_m88@mail.ru, Н.К. Полуянович, nik1-58@mail.ru

Институт радиотехнических систем и управления (ИРТСиУ), г. Таганрог

В данной статье 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 . Показано, что напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений, а кажущаяся амплитуда ЧР - их разрядную площадь, то есть все геометрические характеристики включений становятся известными.

Ключевые слова: тепловой пробой; изоляционные материалы; частичные разряды.

MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT OF THE CZECH REPUBLIC AND PREDICTION OF BREAKDOWN OF INSULATING MATERIALS

M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich

Institute of radio engineering systems and management, Taganrog

In this article the theoretical justification of the processes and mechanism of electric breakdown in insulating materials. The proposed mathematical model and quantitative integral characteristics of partial discharges (PD) in insulating materials and prediction of the appearance of inclusion. On the basis of the calculation of the characteristics of the PD, the connection between the change of the ignition voltage of the PD U_x and ka-juegosa of the charge q the size of the defect in insulation, as well as changes in the ignition voltage of the PD U_x and the apparent charge q by the dielectric constant ϵ of the insulation. The ignition voltage allows to determine 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.

Key words: thermal breakdown; insulation materials; partial discharges.

Введение. В процессе эксплуатации силовых кабельных линий (СКЛ) изоляционные материалы подвергаются различным воздействиям [1,2, 9-13]. В результате воздействующих факторов (тепловое, электрическое, механическое, а также воздействие окружающей среды или в процессе изготовления в диэлектрике появляются неоднородности, газовые или воздушные включения [1–3]. Тепловой пробой связан с разогревом диэлектрика при протекании тока проводимости и развития диэлектрических потерь [4,5]. Таким образом, разработка неразрушающего метода диагностики кабелей является перспективной и актуальной задачей, которая позволяет увеличить надежность электроснабжения потребителей решая основную задачу энергоснабжающих организаций.

Закономерности процесса развития ЧР. Для выявления закономерностей развития ЧР в газовых включениях, определены характеристики ЧР [16], участвующие в разрушении изоляционных материалов. При приложении к изоляционному материалу напряжения $U=U_m \sin \omega t$, напряжение на включении, U_B будет равно: $U_B = U \cdot C_{II} / (C_B + C_{II})$. 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 (ЧР) емкости включения.



$$U_{\text{чр}} = U_{\text{в.пр}} \varepsilon_{r,i} h / \delta K_H \varepsilon_{r,v} \sqrt{2}, \quad (1)$$

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

$$U_{\text{в}} = U \varepsilon_{r,\text{т.в.}} \cdot h_{\text{в}}/h, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{r,\text{т.в.}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала.

Тепловыделение в электрической изоляции. Количество выделяемого в диэлектрике тепла пропорционально диэлектрическим потерям [17], т.е.

$$Q_{\text{выд}} = U^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{в}} \cdot \text{tg} \delta_t, \text{ где } \text{tg} \delta_t = \text{tg} \delta_0 e^{a(\theta - \theta_0)} \quad (3)$$

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

$$Q = \Delta \theta / R; \quad R = \Delta / \lambda \cdot S \quad (4)$$

Здесь R – тепловое сопротивление; λ – коэффициент теплопроводности; S – поверхность охлаждения; Δ – толщина диэлектрика; ΔT – перепад температуры. Согласно уравнения Фурье для теплового потока.

$$\Delta Q = \lambda \cdot d\theta / dx \quad (5)$$

При конвективном теплообмене:

$$Q = \alpha_k \cdot S_{\text{п.о.}} \cdot (\theta_{\text{пв}} - \theta_0), \quad (6)$$

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 [6, 7]. Тепловыделение в слоях изоляции [17-19]

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

где ω – угловая частота ($\omega = 2\pi f$); $C_i = \varepsilon \varepsilon_0 S_i / h_i$, – емкость слоя, l_i – длина изоляционного материала, $\text{tg} \delta_i$ – значение $\text{tg} \delta$ с учетом типа изоляции

$$\theta_{\text{ж}} = \theta_{\text{пв}} + n \cdot I^2 \cdot \rho_{20} \cdot T_k K_p (1 + \alpha_k \cdot Q / \alpha \cdot S) / S. \quad (7)$$

Для регистрации термофлуктуационных процессов [19] в изоляционных материалах, выделяемое количество тепла Q , в результате ЧР, будем оценивать с помощью пропорциональной ей величине через температуру на жиле (7) [20].

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

Таким образом, получена математическая модель развития ЧР и формирования теплового пробоя. Критериями оценки работоспособности кабелей по данному методу являются: напряжение возникновения частичных разрядов ($U_{\text{воз}}$), уровень ЧР (Q), коэффициент старения (P), коэффициент нелинейности (Q_s) а также частота и их интенсивность.



Оценки технического состояния СКЛ. Кабельная линия исследовалась аппаратурой OWTs (напряжения возникновения частичных разрядов, $U_{\text{воз}}$; максимальной величины (уровня) ЧР q , результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1. Исследование диэлектрических параметров состояния СКЛ

Кабельная система	Параметры диэлектрического старения ($I_{\text{раб}}$, $U_{\text{воз}}$)		Рекомендации по техническому обслуживанию			
	Коэффициент старения P	Коэффициент нелинейности QS	Степень увлажнённости	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.

Как следует из табл. 1 исправная изоляция имеет значение максимального кажущегося заряда намного меньшей величины установленной стандартом. Основываясь на параметрах ЧР [13] (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 $h_v \ll h$ (толщина изоляции) составляет/

$$U_v = U \varepsilon h_v / (h + (\varepsilon - 1)h_v). \quad (8)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Если падение напряжения на включении достигнет пробивного напряжения воздуха $U_{\text{в.пр.}}(h_v)$ в соответствии с эмпирическим законом Пашена [1,3], то воздушное включение пробьётся. Точки пересечения кривых $U_v(h_v)$ и $U_{\text{в.пр.}}(h_v)$ определяют диапазон размеров включений от h_{v1} до h_{v2} , в которых вспыхивают ЧР. По мере увеличения напряжения ЧР охватывают все больший диапазон размеров включений. Между кажущейся амплитудой ЧР во включении и его разрядной площадью существует функциональная связь.

$$q = U_{\text{в.пр.}} \varepsilon \varepsilon_0 S_v / (h - h_v). \quad (9)$$

Напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений в соответствии с (8), а кажущаяся амплитуда ЧР – их разрядную площадь на основании (9). Таким образом, все геометрические характеристики включений становятся известными. С помощью данных критериев (напряжение возникновения ЧР, уровень ЧР, коэффициент старения; коэффициент нелинейности) стало возможным быстро и детально определять и достаточно точно прогнозировать, развитие выявленных скрытых дефектов до пробоя [18,19], табл. 1.

Заключение. 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 . 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. Следовательно, напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений в соответствии с (8), а кажущаяся амплитуда ЧР – их разрядную площадь на основании (9).

Список литературы

1. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. - Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1979. - 224 с.
2. Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. М. Энергоатомиздат, 1988 152 с.
3. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. - М.: Энергия, 1980.-112с.
4. Важнов В.Ф. Техника высоких напряжений: курс лекций / В.Ф. Важнов, В.А. Лавринович. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.
5. М.Н. Дубяго, Исследование характеристик частичных разрядов в электрической изоляции систем электроснабжения. ж. Известия ЮФУ. Технические науки. № 11 2013 г. с.201-207.
6. Dubyago M.N., N.K. Poluyanovich. 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,Page 479str. (p.418-422)
7. M.N. Dubyago, 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 Vols. 448-453 (2014) pp 2455-2460.
8. Бунзя А.А. Разработка трехмерной имитационной модели высоковольтной изоляции с множеством дефектов // Транспорт Урала. - 2009. - №4 (23). - с. 89-92.
9. Полуянович Н.К. Силовая электроника. Таганрог. Изд-во ТРТУ.2005-209с.
10. Полуянович Н.К. Энергетическая электроника. Пособие по решению задач и методические указания. Таганрог: Из-во ТРТУ, 2001, 86с.
11. Полуянович Н.К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. Учебное пособие. /Санкт-Петербург, 2012. - 400 с. Сер. Учебники для вузов. Специальная литература.
12. Полуянович Н.К. Методы автоматизации синтеза нелинейных резистивных цепей. Учебное пособие / Таганрог, 1999.
13. Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго, В.А. Щуровский. Методы испытания силового электрооборудования. Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 136с.
14. N.K. Polujanovich, D.P. Rassoha, V.S. Formanjuk. 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, Page 363str. (p.265-269).
15. 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 Vols. 459 Trans Tech Publications, Switzerland (2014) pp 70-75.
16. М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович. Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследовании изоляции кабельных линий. / ж. Известия ЮФУ. Технические науки. №7 2012 г. с. 200-205.
17. Меркулов В.И. Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях. Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2001.- 156с.



18. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Бурьков Д.В. Разработка метода прогнозирования процесса старения изоляции на основе термофлуктуационной теории частичных разрядов. Инженерный вестник Дона, №3 (2017).
19. М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович. В.Х. Пшихопов. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов. ж. Вестник ДГТУ, №3 (90), 2017, с.117-127.
20. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.. Метод диагностики и прогнозирования теплового пробоя изоляционных материалов вызванных частичными разрядами. Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. №8 (193), С.179-189.