

В. М. Кутин, д. т. н., проф.; М. П. Лабзун

ДИАГНОСТИКА ОПОРНО-СТЕРЖНЕВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

В статье описана возможность применения методов и средств инфракрасной техники для выявления повреждений опорно-стержневых изоляторов на ранней стадии их развития. Проведено исследование влияния диэлектрических потерь фарфора на тепловые процессы в изоляторах. Показано, что выявление температурных аномалий, с превышением температуры менее чем на 0,2 – 0,3 °С, средствами инфракрасной техники возможно при увеличении диэлектрических потерь в 20 – 30 раз по сравнению с нормой.

Ключевые слова: повреждение изолятора, диэлектрические потери, нагревание изолятора.

Вступление

В электроустановках напряжением 110 – 750 кВ широко применяются опорно-стержневые изоляторы (ОСИ). Опыт эксплуатации электрооборудования распределительных устройств станций и подстанций напряжением 110 кВ и выше свидетельствует, что опорно-стержневые изоляторы являются элементом, который наиболее часто повреждается, особенно изоляторы в составе разъединителей. Количество технологических нарушений, связанных с разрушением ОСИ в электроэнергетических системах Украины в целом составляет десятки за год [1]. Большое количество аварий предопределяет необходимость улучшения качества диагностики ОСИ.

В Украине, согласно действующей нормативной документации [2], контроль технического состояния ОСИ предусматривает контроль внешнего состояния, измерения сопротивления изоляции, механические испытания, контроль ОСИ ультразвуковым методом, диагностику изоляторов средствами инфракрасной техники [3], испытание образцов фарфора из технологических конечностей во время производства изоляторов [4].

Контроль внешнего состояния ОСИ бесспорно остается актуальным, однако значительное количество изоляторов повреждается без образования видимых трещин. Измерение сопротивления изоляторов показало очень низкую эффективность, из 20-ти полностью разрушенных изоляторов лишь один имел сопротивление, которое не удовлетворяло требованиям [1]. Механические испытания не могут проводиться на разъединителях и выключателях классов напряжения больше 220 кВ [5]. Выявление дефектных изоляторов с помощью средств инфракрасной техники является бесспорно перспективным, однако, во-первых, они требуют определенного состояния изоляторов, а во-вторых, не позволяют однозначно утверждать об их эксплуатационной пригодности, особенно на ранней стадии развития повреждений [6]. Это же касается методов, основанных на регистрации ультрафиолетового излучения. Метод фуксиновой пробы под давлением [4] является однозначным показателем наличия открытой пористости, однако, в эксплуатации этот метод непригоден, потому что невозможен без разрушения изоляторов. Для метода ультразвуковой структурометрии отсутствуют четкие критерии отбраковки изоляторов по скорости распространения ультразвуковых волн.

Цель работы. Определение диагностических параметров для выявления механических повреждений ОСИ на ранней стадии их развития методами инфракрасной техники.

Известно, что фарфор является неполярным диэлектриком, то есть молекулы имеют симметричное строение: центры эквивалентных положительного и отрицательного зарядов у них совпадают, поэтому, во время отсутствия внешнего поля, неполярные молекулы не имеют собственного электрического момента. Наличие дефекта в виде открытой микроскопической пористости [6] в изоляторе может привести к насыщению влагой внутреннего объема

фарфорового тела. Молекулы воды являются постоянными диполями, что вызывает резкое увеличение диэлектрических потерь, предопределенное увеличением интенсивности дипольной поляризации.

Тангенс угла диэлектрических потерь является интегральным параметром, который учитывает поляризационные потери, потери внутренней электропроводности и потери за счет токов поверхностной проводимости, и определяется величиной сдвига вектора тока в сравнении с вектором тока в идеальном диэлектрике. Качественный фарфор опорно-стержневых изоляторов характеризуется незначительными диэлектрическими потерями $tg\delta \leq 0,025$ [7]. Суммарная энергия рассеивания, которая выделяется в определенном объеме изолятора и предопределена активной составляющей тока поляризации и электропроводностью, рассчитывается по формуле:

$$P_T = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta, \quad (1)$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – угловая частота приложенного напряжения, c^{-1} ; U – напряжение прикладывается к изолятору, кВ; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, при $f = 50 Гц$, для качественного фарфора [7] $tg\delta \leq 0,025$; C – емкость изолятора, мкФ.

Энергия рассеивания, которая выделяется в изоляторе в переменном электрическом поле, превращается в тепловую энергию, вызывая нагревание фарфора изолятора. При образовании разницы температур между изолятором и воздухом, тепловая энергия отдается окружающей среде путем теплообмена – необратимого процесса перенесения тепловой энергии в пространстве, обусловленного неоднородным температурным полем.

По второму закону термодинамики теплота переносится в направлении меньшей температуры. Количество энергии, отнесенное к единице поверхности, которая переносится за счет теплопроводности, по закону Фурье [8], пропорциональна градиенту температуры и определяется, как плотность теплового потока, где знак минус указывает направление перенесения теплоты

$$q = -\lambda \cdot grad(T), \quad (2)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности, который характеризует способность вещества проводить теплоту, для фарфора [7] $\lambda = 1,68$ Вт/(м·°К); $grad(T)$ – градиент температуры, °К.

Аналитическое выражение плотности теплового потока теплоотдачи от поверхности изолятора к воздуху определяется законом Ньютона [8]:

$$q_n = \alpha \cdot (T_\phi - T_n), \quad (3)$$

где q_n – плотность теплового потока, который передается от поверхности тела к воздуху, Вт/м²; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°К; T_ϕ – температура поверхности изолятора, °К; T_n – температура воздуха, °К.

Коэффициент теплоотдачи α определяет тепловой поток, который передается через единицу поверхности изолятора при разнице температур между поверхностью и воздухом 1°К. По физическому содержанию α – величина, обратная сумме термических сопротивлений в системе, через которую распространяется тепловой поток, и имеет сложную зависимость от аэродинамических условий вблизи поверхности, ее размеров и формы, теплоемкости и физических свойств воздуха.

Передачу тепла от поверхности твердого тела к внешней среде можно рассматривать, как теплопроводность через тонкий слой воздуха, соприкасающегося с поверхностью твердого тела. По закону теплоотдачи Ньютона (2) и теплопроводности Фурье (3), уравнение теплообмена на границе между изолятором и воздухом выглядит так:

$$-\lambda_n \cdot \text{grad}(T) = \alpha \cdot (T_\phi - T_n), \quad (4)$$

где λ_n – коэффициент теплопроводимости воздуха, при $T = 300^\circ\text{K}$ [2], $\lambda_n = 26,2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$.

Температурный градиент теплоносителя в левой части уравнения (4) определяет плотность теплового потока, который переносится путем теплопроводности через теоретически бесконечно тонкий слой воздуха, неподвижного относительно поверхности тела. Коэффициент теплоотдачи α в правой части уравнения характеризует интенсивность теплоотдачи от поверхности изолятора воздуху конвекцией и тепловым излучением.

Рассмотрим температурное поле и тепловые процессы внутри изолятора. По первому закону термодинамики, количество теплоты, которое теряется телом, может появиться лишь за счет уменьшения внутренней энергии тела за единицу времени $\left(-\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}\right)$, а также за счет действия внутренних источников теплоты мощностью q_v . Для процесса, который не учитывает зависимость теплоемкости от температуры, справедливо выражение [9]:

$$dQ = \int_V (q_v - \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}) dt dV, \quad (5)$$

где q_v – мощность рассеивания электрической энергии в единице объема, Вт/м^3 ; c_p – удельная теплоемкость материала, для фарфора [7] при $T = 300^\circ\text{K}$, $c_p = 750 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°K)}$; ρ – плотность материала, для фарфора [7] $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$; V – объем тела, м^3 ; t – время действия переменного электрического поля на изолятор, с; T – температура фарфора, $^\circ\text{K}$.

С учетом формул (2) и (5) уравнение теплопроводности для изолятора приобретает форму (6), которая устанавливает связь пространственно-временных изменений температуры внутри изолятора, то есть выражает зависимость изменения во времени температуры какой-то точки тела от свойств поля и мощности рассеивания энергии вблизи этой точки

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{grad}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) + q_v. \quad (6)$$

В дальнейшем для расчетов, при определенных предположениях, как отсутствие суточных колебаний температуры, изменения скорости ветра и тому подобное, можно считать, что процесс стационарен: при достижении определенной величины температура внутри и на поверхности изолятора со временем не изменяется, то есть $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$. Следовательно, с учетом (4) получим:

$$\text{grad}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) + q_v = 0. \quad (7)$$

Для оценки процессов теплообмена будем рассматривать изолятор как сплошной цилиндр радиусом $R = d/2$, с равномерно распределенными в нем внутренними источниками энергии мощностью q_v , который находится в воздушной среде. При этом ребристость формы боковой поверхности не учитывается, а средний диаметр изолятора d принимается как среднее между диаметром ребра и диаметром межреберной части изолятора. В качестве теплоносителя – подвижной среды, которая участвует в теплообмене и интенсифицирует его, выступает воздух, который имеет температуру T_n и коэффициент теплоотдачи α .

Если теплоотдачу фарфорового тела изолятора фланцам не учитывать, то в силу симметрии температурное поле внутри изолятора будет одномерным $T = f(r)$. В случае, если на расстоянии r от оси изолятора выделить изотермическую поверхность, то при устоявшемся режиме тепло, которое выделяется в объеме $V_r = \pi \cdot r^2 \cdot h$, будет передаваться

через изотермическую поверхность площадью $F_r = 2\pi \cdot r \cdot h$ за счет теплопроводности.

Тепловой поток через изотермическую поверхность, которая находится на расстоянии $r = R$ от центральной вертикальной оси изолятора, с учетом формулы (2), можно представить в виде:

$$Q = -F \cdot \lambda (\partial T / \partial r) = -2\pi \cdot R \cdot h \cdot \lambda (\partial T / \partial r), \quad (8)$$

где Q – мощность внутренних источников энергии в изоляторе, Вт; $F = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h$ – площадь поверхности изолятора, м²; λ – коэффициент теплопроводности фарфора, Вт/(м·°К).

В цилиндрической системе координат при $\lambda = const$ для одномерной системы уравнения (7) можно представить в виде [8]:

$$\frac{\partial}{\partial r} (r^n \partial T / \partial r) = \frac{-q_v \cdot r}{\lambda}, \quad (9)$$

где n – показатель степени, величина которой зависит от формы тела, для цилиндрической формы $n = 1$.

После первого интегрирования получаем выражение

$$T = -\frac{1}{2} \cdot r \cdot \frac{q_v}{\lambda} + \frac{C_1}{r}, \quad (10)$$

где C_1 – константа интегрирования.

Так как при $r = 0$, из условий симметрии $dT/dr = 0$, следовательно $C_1 = 0$.

После повторного интегрирования уравнение (9) приобретает форму

$$T = -\frac{1}{4} \cdot r^2 \cdot \frac{q_v}{\lambda} + C_1 \cdot \ln r + C_2, \quad (11)$$

где C_2 – константа интегрирования.

Рассмотрим уравнение (4) для предельных условий на внешней поверхности изолятора, то есть при $r = R$, а $(\partial T / \partial r)_\phi = -q_v \cdot R / 2\lambda$ и $T = T_\phi = T_n - r^2 \cdot q_v / 4\lambda + C_2$:

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_\phi = \alpha \cdot (T_\phi - T_n). \quad (12)$$

Подставим предельные условия в формулу (12) и найдем C_2 :

$$C_2 = T_n + \frac{1}{2} \cdot q_v \cdot R \cdot \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{R}{2\lambda} \right). \quad (13)$$

Получим распределение температуры внутри изолятора, подставив константу интегрирования (13) в выражение (11):

$$T = T_n + q_v \cdot R / 2\alpha + q_v \cdot (R^2 - r^2) / 4\lambda. \quad (14)$$

где T – температура фарфора на расстоянии r от вертикальной оси изолятора, °К; T_n – температура воздуха, °К; λ – коэффициент теплопроводности фарфора, Вт/(м·°К); q_v – мощность рассеивания электрической энергии в единице объема, Вт/м³; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°К; R – радиус изолятора, м.

На вертикальной оси изолятора при $r = 0$, температура T максимальная, а температура на поверхности фарфора T_ϕ при $r = R$, будет определяться уравнением:

$$T_\phi = T_n + q_v \cdot R / 2\alpha, \quad (15)$$

где T_ϕ – температура поверхности изолятора, °К.

Таким образом, с учетом (14) и (15), температурное поле внутри изолятора описывается формулой:

$$T = T_{\phi} + \frac{q_v}{4\lambda} \cdot R^2 - \frac{q_v}{4\lambda} \cdot r^2. \quad (16)$$

Оценка параметров теплообмена проведено для опорно-стержневого изолятора типа ИОС-110-600 со средним диаметром $d = 0,2$ м и высотой $h = 1,1$ м, который имеет белую глазурь и обдувается поперечным воздушным потоком с температурой $T_n = 300$ °К ($T_n = 27$ °С) при нормальном атмосферном давлении.

Таблица 1

Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$.

Скорость ветра v , м/с	Превышение температуры поверхности изолятора над температурой воздуха $(T_{\phi} - T_n)$, °К							
	0,3	0,5	1	2	3	4	5	10
	Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$							
0,2	0,42	0,70	1,41	2,83	4,25	5,69	7,13	14,48
0,4	0,49	0,82	1,64	3,28	4,93	6,59	8,26	16,74
0,6	0,56	0,93	1,87	3,74	5,62	7,52	9,42	19,05
0,8	0,62	1,03	2,07	4,15	6,23	8,33	10,43	21,09
1	0,68	1,13	2,26	4,52	6,79	9,07	11,36	22,94
1,5	0,80	1,33	2,67	5,34	8,03	10,72	13,42	27,07
2	0,91	1,51	3,03	6,07	9,12	12,18	15,24	30,70
2,5	1,01	1,68	3,36	6,73	10,12	13,50	16,90	34,02
3	1,10	1,83	3,67	7,35	11,04	14,74	18,44	37,10
4	1,27	2,12	4,23	8,47	12,72	16,98	21,25	42,72
5	1,47	2,45	4,91	9,82	14,75	19,68	24,62	49,47

Диэлектрические потери, согласно уравнению (1), определяются величинами прикладываемого к изолятору напряжения U , собственной емкости изолятора C и тангенса угла диэлектрических потерь.

Для оценивания диэлектрических потерь будем считать, что к изолятору прикладывается переменное напряжение $U = 100$ кВ, при $f = 50$ Гц, а емкость изолятора $C = 1,2 \cdot 10^{-6}$ мкФ.

С учетом принятых предположений, основным фактором, который влияет на интенсивность рассеивания энергии в изоляторе является тангенс угла диэлектрических потерь, который можно определить по формуле [10]:

$$tg\delta = \frac{\chi \cdot \lambda_n \cdot (\rho_n \cdot v \cdot d / \mu_n)^m \cdot \pi \cdot h \cdot (T_{\phi} - T_n) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d \cdot h \cdot (T_{\phi}^4 - T_n^4)}{U^2 \cdot \omega \cdot C}, \quad (17)$$

где χ и m – коэффициенты, которые зависят от типа потока воздуха и от геометрии изолятора; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·°К⁴; d – средний диаметр изолятора.

С помощью уравнения (17) получим расчетные величины $tg\delta$ (таблица 1).

Таким образом, с учетом принятых ограничений, даже для незначительного нагревания изолятора, при незначительной скорости ветра, необходимо увеличение $tg\delta$ в 20 – 30 раз, по сравнению с качественным фарфором, для которого $tg\delta \leq 0,025$.

Выводы

1. Основной причиной нагревания опорно-стержневых изоляторов, как правило, являются потери на дипольную поляризацию, связанные с увлажнением фарфора, которые приводят к увеличению $tg\delta$.

2. Для выявления температурных аномалий изолятора средствами инфракрасной техники необходимо, чтобы превышение температуры составляло не меньше чем $0,2 - 0,3^{\circ}\text{K}$, что требует увеличения $tg\delta$ в 20 – 30 раз, по сравнению с качественным фарфором.

3. Теплоотдача от поверхности изолятора происходит вынужденной конвекцией и излучением, при этом конвекция начинает преобладать над теплоотдачей излучением при скорости ветра 0,5 м/с. В реальных условиях влияние естественной конвекции в процессе теплоотдачи можно считать несущественным.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лабзун М. П. Методи та засоби діагностування опорно-стрижневих ізоляторів: монографія / М. П. Лабзун, О. Є. Рубаненко, В. М. Кутін. – Вінниця, ВНТУ, 2010 – 323 с.
2. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302: 2007. – [Чинний з 15.04.07]. – Офіційне видання. – К.: ГРІФРЕ: Міністерство палива та енергетики України». 2007-11. 262 с. (Нормативний документ Міністерство палива та енергетики України. Норма).
3. Технічне діагностування електрообладнання на контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередач засобами інфрачервоної техніки: СОУ-Н ЕЕ 20.577: 2007. – [Чинний з 16.03.07]. – Офіційне видання. – К.: ДП «НТКУ «АсЕлЕнерго». Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 119 с.
4. ГОСТ 20419-83 «Материалы керамические электротехнические классификация и технические требования». – [Чинний з 01.01.85]. – М. ИПК. Издательство стандартов, 2002. – 8 с.
5. Кутін В. М. Система перевірки механічної міцності опорно-стрижневих ізоляторів роз'єднувачів і відокремлювачів / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету – 2004. – № 2 (35). – С. 109 – 111.
6. Шейкин А. А. Технологии оценки состояния фарфоровых изоляционных конструкций высоковольтных электроустановок / А. А. Шейкин, А. И. Таджикибаев, Ю. А. Омельченко, М. А. Надеяев. – Санкт-Петербург, Петербургский энергетический институт повышения квалификации (ПЭИПК), 2004. – 110 с.
7. Григорьев И. С. Физические величины. Справочник / И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов. – М.: Атомиздат, 1991. – 1232 с.
8. Крутов В. И. Теплотехника. Учебник для вузов / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
9. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник / Х. Уонг, – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
10. Лабзун М. П. Діагностичні параметри теплових процесів в опорно-стрижневих ізоляторах при їх пошкодженнях / М. П. Лабзун, В. Л. Таловер'я, В. М. Кутін // Вісник Кременчуцького державного технічного університету – 2010. – № 3. – С. 100 – 104.

Кутин Василий Михайлович – д. т. н., профессор кафедры электрических станций и систем, тел.: (0432) 46-83-84.

Винницкий национальный технический университет.

Лабзун Михаил Павлович – инженер, e-mail: sgi@rdcm.sw.energy.gov.ua
Юго-Западная электроэнергетическая система.