

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

ДІАГНОСТИКА ОПОРНО-СТРИЖНЕВИХ ІЗОЛЯТОРІВ

У статті описується можливість застосування методів та засобів інфрачервоної техніки для виявлення пошкоджень опорно-стрижневих ізоляторів на ранній стадії їх розвитку. Проведено дослідження впливу діелектричних втрат фарфору на теплові процеси в ізоляторах. Показано, що виявлення температурних аномалій з перевищенням температури менше ніж на 0,2 – 0,3 °С засобами інфрачервоної техніки можливе при збільшенні діелектричних втрат ізолятора в 20 – 30 разів у порівнянні з нормою.

Ключові слова: пошкодження ізолятора, діелектричні втрати, нагрівання ізолятора.

Вступ

В електроустановках напругою 110 – 750 кВ широко застосовуються опорно-стрижневі ізолятори (ОСІ). Досвід експлуатації електроустаткування розподільних пристроїв станцій і підстанцій напругою 110 кВ та вище свідчить, що опорно-стрижневі ізолятори є елементом, який найбільш часто пошкоджується, особливо ізолятори у складі роз'єднувачів. Кількість технологічних порушень, пов'язаних з руйнуванням ОСІ в електроенергетичних системах України в цілому складає десятки за рік [1]. Велика кількість аварій зумовлює необхідність поліпшити якість діагностики ОСІ.

В Україні, згідно з діючою нормативною документацією [2], контроль технічного стану ОСІ передбачає контроль зовнішнього стану, вимірювання опору ізоляції, механічні випробування, контроль ОСІ ультразвуковим методом, діагностику ізоляторів засобами інфрачервоної техніки [3], випробування зразків фарфору з технологічних кінцівок під час виробництва ізоляторів [4].

Контроль зовнішнього стану ОСІ безперечно залишається актуальним, однак значна кількість ізоляторів пошкоджується без утворення видимих тріщин. Вимірювання опору ізоляторів показало дуже низьку ефективність, з 20-ти повністю зруйнованих ізоляторів лише один мав опір, який не задовольняв вимогам [1]. Механічні випробування не можуть проводитись на роз'єднувачах та вимикачах класів наруги більше 220 кВ [5]. Виявлення дефектних ізоляторів за допомогою засобів інфрачервоної техніки є безперечно перспективним, однак, по-перше, вони потребують певного стану ізоляторів, а по-друге, не дозволяють однозначно стверджувати про їхню експлуатаційну придатність, особливо на ранній стадії розвитку пошкоджень [6]. Це ж стосується методів, заснованих на реєстрації ультрафіолетового випромінювання. Метод фуksiнової проби під тиском [4] є однозначним показником наявності відкритої пористості, однак в експлуатації цей метод непридатний, тому що неможливий без руйнування ізоляторів. Для методу ультразвукової структурометрії відсутні чіткі критерії відбракування ізоляторів за швидкістю розповсюдження ультразвукових хвиль.

Мета роботи. Визначення діагностичних параметрів для виявлення механічних пошкоджень ОСІ на ранній стадії їх розвитку методами інфрачервоної техніки.

Відомо, що фарфор є неполярним діелектриком, тобто молекули мають симетричну будову: центри еквівалентних позитивного та негативного зарядів у них збігаються, тому, під час відсутності зовнішнього поля, неполярні молекули не мають власного електричного моменту. Наявність дефекту у вигляді відкритої мікроскопічної пористості [6] в ізоляторі може призвести до насичення вологою внутрішнього об'єму фарфорового тіла. Молекули води є постійними диполями, що викликає різке збільшення діелектричних втрат, зумовлене збільшенням інтенсивності дипольної поляризації.

Тангенс кута діелектричних втрат є інтегральним параметром, який враховує поляризаційні втрати, втрати внутрішньої електропровідності та втрати за рахунок струмів поверхневого витоку, і визначається величиною зсуву вектора струму у порівнянні з вектором струму в ідеальному діелектрику. Якісний фарфор опорно-стрижневих ізоляторів характеризується незначними діелектричними втратами $tg\delta \leq 0,025$ [7]. Сумарна енергія розсіювання, яка виділяється в певному об'ємі ізолятора і зумовлена активною складовою струму поляризації та електропровідністю, розраховується за формулою:

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

де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кутова частота прикладеної напруги, c^{-1} ; U – напруга, прикладена до ізолятора, кВ; $tg\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат, при $f = 50 Гц$, для якісного фарфору [7] $tg\delta \leq 0,025$; C – ємність ізолятора, мкФ.

Енергія розсіювання, яка виділяється в ізоляторі, в змінному електричному полі перетворюється в теплову енергію, викликаючи нагрівання фарфору ізолятора. При утворенні різниці температур між ізолятором та повітрям, тепла енергія віддається навколишньому середовищу шляхом теплообміну – незворотного процесу перенесення теплової енергії в просторі, зумовленого неоднорідним температурним полем.

Згідно з другим законом термодинаміки теплота переноситься в напрямку меншої температури. Кількість енергії, віднесена до одиниці поверхні, яка переноситься за рахунок теплопровідності, згідно з законом Фур'є [8], пропорційна градієнту температури та визначається, як щільність теплового потоку, де знак мінус вказує напрям перенесення теплоти

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

де q – щільність теплового потоку, $Вт/м^2$; λ – коефіцієнт теплопровідності, який характеризує здатність речовини проводити теплоту, для фарфору [7] $\lambda = 1,68$ $Вт/(м \cdot ^\circ K)$; $grad(T)$ – градієнт температури, $^\circ K$.

Аналітичний вираз щільності теплового потоку тепловіддачі від поверхні ізолятора до повітря визначається законом Ньютона [8]:

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

де q_n – щільність теплового потоку, який передається від поверхні тіла до повітря, $Вт/м^2$; α – коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/м^2 \cdot ^\circ K$; T_ϕ – температура поверхні ізолятора, $^\circ K$; T_n – температура повітря, $^\circ K$.

Коефіцієнт тепловіддачі α визначає тепловий потік, який передається через одиницю поверхні ізолятора при різниці температур між поверхнею та повітрям $1^\circ K$. По фізичному змісту α – величина, зворотна сумі термічних опорів в системі, через яку поширюється тепловий потік, і мають складну залежність від аеродинамічних умов поблизу поверхні, її розмірів і форми, теплоємності та фізичних властивостей повітря.

Передачу тепла від поверхні твердого тіла до зовнішнього середовища можна розглядати, як теплопровідність через тонкий шар повітря, який дотичний до поверхні твердого тіла. Згідно з законом тепловіддачі Ньютона (2) та теплопровідності Фур'є (3), рівняння теплообміну на межі між ізолятором та повітрям має вигляд:

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

де λ_n – коефіцієнт теплопровідності повітря, при $T = 300^\circ K$ [2], $\lambda_n = 26,2 \cdot 10^{-3}$ $Вт/(м \cdot ^\circ K)$.

Температурний градієнт теплоносія в лівій частині рівняння (4) визначає щільність теплового потоку, який переноситься шляхом теплопровідності через теоретично

нескінченно тонкий шар повітря нерухомого відносно поверхні тіла. Коефіцієнт тепловіддачі α в правій частині рівняння характеризує інтенсивність тепловіддачі від поверхні ізолятора повітрю конвекцією та тепловим випромінюванням.

Розглянемо температурне поле та теплові процеси всередині ізолятора. Згідно з першим законом термодинаміки, кількість теплоти, яка втрачається тілом, може з'явитися лише за рахунок зменшення внутрішньої енергії тіла за одиницю часу $\left(-\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}\right)$, а також за рахунок дії внутрішніх джерел теплоти потужністю q_v . Для процесу, який не враховує залежність теплоємності від температури, справедливий вираз [9]:

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

де q_v – потужність розсіювання електричної енергії в одиниці об'єму, Вт/м³; c_p – питома теплоємність матеріалу, для фарфору [7] при $T = 300$ °К $c_p = 750$ Дж/(кг·°К); ρ – густина матеріалу, для фарфору [7] $\rho = 2500$ кг/м³; V – об'єм тіла, м³; t – час дії змінного електричного поля на ізолятор, с; T – температура фарфору, °К.

З урахуванням формул (2) та (5) рівняння теплопровідності для ізолятора набуває форми (6), яка встановлює зв'язок просторово-часових змін температури всередині ізолятора, тобто визначає залежність зміни в часі температури якоїсь точки тіла від властивостей поля та потужності розсіювання енергії поблизу цієї точки.

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

У подальшому, для розрахунків, при певних припущеннях, як відсутність добових коливань температури, зміни швидкості вітру тощо, можна вважати, що процес стаціонарний: при досягненні певної величини температура всередині та на поверхні ізолятора з часом не змінюється, тобто $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$. Отже, з урахуванням (4) отримаємо:

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

Для оцінювання процесів теплообміну будемо розглядати ізолятор як суцільний циліндр радіусом $R = d/2$, з рівномірно розподіленими в ньому внутрішніми джерелами енергії потужністю q_v , який знаходиться в повітряному середовищі. При цьому ребристість форми бічної поверхні не враховується, а середній діаметр ізолятора d приймається, як середнє між діаметром ребра та діаметром міжреберної частини ізолятора. В якості теплоносія – рухливого середовища, яке бере участь у теплообміні й інтенсифікує його, виступає повітря, що має температуру T_n та коефіцієнт тепловіддачі α .

Якщо тепловіддачу фарфорового тіла ізолятора фланцям не враховувати, то у зв'язку із симетрією температурне поле всередині ізолятора буде одномірним $T = f(r)$. У разі, якщо на відстані r від осі ізолятора виділити ізотермічну поверхню, то при усталеному режимі, тепло, яке виділяється в об'ємі $V_r = \pi \cdot r^2 \cdot h$, буде передаватися через ізотермічну поверхню площею $F_r = 2\pi \cdot r \cdot h$ за рахунок теплопровідності.

Тепловий потік через ізотермічну поверхню, яка знаходиться на відстані $r = R$ від центральної вертикальної осі ізолятора, з врахуванням формули (2), можна представити у вигляді:

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

де Q – потужність внутрішніх джерел енергії в ізоляторі, Вт; $F = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h$ – площа поверхні ізолятора, м²; λ – коефіцієнт теплопровідності фарфору, Вт/(м·°К).

У циліндричній системі координат при $\lambda = const$ для одомірної системи рівняння (7) можна представити у вигляді [8]:

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

де n – показник степені, величина якого залежить від форми тіла, для циліндричної форми $n = 1$.

Після першого інтегрування отримуємо вираз:

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

де C_1 – константа інтегрування.

Так як при $r = 0$, з умов симетрії, $dT/dr = 0$, отже $C_1 = 0$.

Після повторного інтегрування рівняння (9) набуває форми:

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

де C_2 – константа інтегрування.

Розглянемо рівняння (4) для граничних умов на зовнішній поверхні ізолятора, тобто при $r = R$, а $(\partial T / \partial r)_\phi = -q_v \cdot R / 2\lambda$ та $T = T_\phi = T_n - r^2 \cdot q_v / 4\lambda + C_2$:

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

Підставимо граничні умови у формулу (12) та знайдемо C_2 :

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

Отримаємо розподілення температури всередині ізолятора, підставивши константу інтегрування (13) у вираз (11):

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

де T – температура фарфору на відстані r від вертикальної осі ізолятора, °К; T_n – температура повітря, °К; λ – коефіцієнт теплопровідності фарфору, Вт/(м·°К); q_v – потужність розсіювання електричної енергії в одиниці об'єму, Вт/м³; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·°К; R – радіус ізолятора, м.

На вертикальній осі ізолятора, при $r = 0$, температура T максимальна, а температура на поверхні фарфору T_ϕ , при $r = R$, буде визначатися рівнянням:

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

де T_ϕ – температура поверхні ізолятора, °К.

Таким чином, з урахуванням (14) та (15), температурне поле всередині ізолятора описується формулою:

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

Оцінювання параметрів теплообміну проведено для опорно-стрижневого ізолятора типу ИОС-110-600 із середнім діаметром $d = 0,2$ м та висотою $h = 1,1$ м, який має білу глазур та омивається поперечним повітряним потоком з температурою $T_n = 300^\circ\text{K}$ ($T_n = 27^\circ\text{C}$) при нормальному атмосферному тиску.

Таблиця 1

Тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$.

Швидкість вітру v , м/с	Перевищення температури поверхні ізолятора над температурою повітря ($T_\phi - T_n$), $^\circ\text{K}$							
	0,3	0,5	1	2	3	4	5	10
	Тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta$							
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

Діелектричні втрати, згідно з рівнянням (1), визначаються величинами прикладеної до ізолятора напруги U , власної ємності ізолятора C та тангенса кута діелектричних втрат.

Для оцінювання діелектричних втрат будемо вважати, що до ізолятора прикладена змінна напруга $U = 100\text{кВ}$, при $f = 50\text{Гц}$, а ємність ізолятора $C = 1,2 \cdot 10^{-6}\text{мкФ}$.

З урахуванням прийнятих припущень, основним фактором, який впливає на інтенсивність розсіювання енергії в ізоляторі є тангенс кута діелектричних втрат, який можна виділити з рівняння [10]:

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

де χ та m – коефіцієнти, які залежать від типу потоку повітря та від геометрії ізолятора; σ – постійна Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}\text{Вт/м}^2 \cdot \text{K}^4$; d – середній діаметр ізолятора.

За допомогою рівняння (17) отримаємо розрахункові величини $tg\delta$ (таблиця 1).

Таким чином, з урахуванням прийнятих припущень, навіть для незначного нагрівання ізолятора, при незначній швидкості вітру, необхідно збільшення $tg\delta$ в 20 – 30 разів, у порівнянні з якісним фарфором, для якого $tg\delta \leq 0,025$.

Висновки

1. Основною причиною нагрівання опорно-стрижневих ізоляторів, як правило, є втрати на дипольну поляризацію, пов'язані зі зволоженням фарфору, які призводять до збільшення $tg\delta$.

2. Для виявлення температурних аномалій ізолятора засобами інфрачервоної техніки необхідно, щоб перевищення температури складало не менше ніж 0,2 – 0,3 $^\circ\text{K}$, що потребує збільшення $tg\delta$ в 20 – 30 разів, у порівнянні з якісним фарфором.

3. Тепловіддача від поверхні ізолятора відбувається вимушеною конвекцією та випромінюванням, при цьому конвекція починає переважати над тепловіддачею випромінюванням при швидкості вітру 0,5 м/с. У реальних умовах вплив природної конвекції в процес тепловіддачі можна вважати несуттєвим.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лабзун М. П. Методи та засоби діагностування опорно-стрижневих ізоляторів: монографія / М. П. Лабзун, О. С. 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.

Кутін Василь Михайлович – д. т. н., професор кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432) 46-83-84.

Вінницький національний технічний університет.

Лабзун Михайло Павлович – інженер, e-mail: sgi@rdcm.sw.energy.gov.ua.

Південно-Західна електро-енергетична система.