

О. І. Сіріков

Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград
**ДІАГНОСТИКА СТАНУ ЗАБРУДНЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ
ІЗОЛЯТОРІВ ПІД НАПРУГОЮ ПО СТРУМУ ВИТОКУ**

Основною причиною аварійних відключень розподільчих електромереж є перекриття і пошкодження ізоляції [1], які виникають внаслідок забруднення поверхні ізоляційних конструкцій, за рахунок осідання продуктів вивітрювання з поверхні землі, а також промислових виносів. небезпеку становлять солі, луги і кислоти, які в твердому стані майже не проводять електричний струм, але при їх розчиненні вологою створюють електроліт з підвищеною електропровідністю який вкриває ізоляційну конструкцію суцільним електропровідним шаром. Волога на поверхні ізоляційної конструкції може виникати внаслідок дощів, туманів, випадіння роси. Останнє найбільш актуальне для комплектних розподільчих пристроїв зовнішньої установки (КРПЗУ) і є головною причиною їх пошкодження. Основним засобом попередження перекриття внаслідок забруднення є профілактична чистка ізоляції КРПЗУ яка за даними Кіровоградобленерго проводиться двічі на рік, і пов'язана з великими витратами в наслідок недовідпуску електроенергії та оплатою висококваліфікованої праці енергетиків тощо.

Кількість забруднюючої речовини на поверхні ізоляторів змінюється в залежності від місця розташування джерела забруднення, характеру його роботи і потужності, погодних умов. Отже, наявність великої кількості факторів, які впливають на процес забруднювання обумовлює його випадковий характер. Тому в деяких випадках чистка ізоляції є передчасною, а в деяких спізненою, що зберігає актуальність питання щодо створення автоматизованої системи контролю за станом забруднення поверхні ізоляторів під робочою напругою.

Найбільш раціональним та інформативним методом неруйнівного контролю забруднення є метод при якому контролюється струм витоку. Перевагою методу є те, що він дозволяє визначати поточний ступінь забрудненості поверхні на будь-який стадії.

При прикладенні високої напруги E до ізолятора через нього починає протікати струм витоку I_B , зумовлений об'ємними і поверхневими явищами, який можна розкласти на сім складових [3]:

$$I_B = I_{BO} + I_{ВП} = I_{BO} + (I_4 + I_5 + I_{ВПЗ}) = (I_1 + I_2 + I_3) + (I_4 + I_5 + I_6 + I_7) \quad (1)$$

де I_{BO} – об'ємний струм витоку,

$I_{ВП}$ – поверхневий струм витоку,

$I_{ВПЗ}$ – поверхневий струм витоку від забруднення,

I_1 – струм, обумовлений ємністю між фланцями через тіло ізолятора,

I_2 – струм активної провідності твердого діелектрика між фланцями,

I_3 – струм абсорбції твердого діелектрика,

I_4 – струм, обумовлений ємністю між фланцем ізолятора і шиною та струмознімальним кільцем через повітря,

I_5 – струм активної провідності по поверхні чистого твердого діелектрика,

I_6 – ємнісний струм, що створюється забрудненням та зволоженням поверхні,

I_7 – струм активної провідності через забруднюючий шар на поверхні.

Виникнення ємнісної складової I_6 в поверхневому струмі витоку від забруднення та зволоження може бути пояснене створенням ємності між

провідним шаром поверхні ізолятора і шиною, а також заземленими частинами комірки КРПЗ (комплектного розподільчого пристрою зовнішньої установки).

Наявність забруднення створює активний струм $\dot{I}_7$, який обумовлений поверхневим опором R_3 і залежить від товщини забруднюючого шару, його хімічного складу, вмісту води і т. і.

Складові об'ємного струму витоку $\dot{I}_{\text{во}}$ не залежать від параметрів забруднення і тому є неінформативними.

Поверхневий струм витоку $\dot{I}_{\text{вп}}$ залежить від характеру і ступеня забруднення, конструктивних особливостей ізолятора, прикладеної напруги, і може бути використаний в якості інформативного параметру контролю:

$$\dot{I}_{\text{вп}} = E \left(j\omega C_{\text{п}} + \frac{1}{R_{\text{п}}} \right) + \dot{I}_{\text{впз}} = E Y_{\text{вп}} e^{j\varphi_{\text{вп}}} \quad (2)$$

Як видно з виразу (2) ще одним інформативним параметром є фазовий кут $\varphi_{\text{вп}}$ поверхневого струму витоку, що використано нами при контролі забруднення і зволоження ізолятора [4].

Для дослідження поверхневого струму витоку скористаємося схемою заміщення зображеною на рис. 1. Враховуючи той факт, що внаслідок забруднення і зволоження поверхня ізолятора стає електропровідною створюючи деяку електричну ємність до струмопровідної шини і заземлених частин. Поверхневий струм витоку через забруднюючий шар змінюється в функції позовдвжньої координати x , внаслідок наявності струмів зміщення через повітря та тіло ізолятора. Для спрощення аналізу зробимо деякі припущення: погонні параметри r_0 , C_1 , C_2 рівномірно розподілені по всій довжині ізолятора, тоді їх можна визначити за формулами:

$$r_0 = \frac{R_3}{H}; \quad C_1 = \frac{C_d}{H}; \quad C_2 = \frac{C_e}{H}$$

де R_3 – активний опір забруднення,

C_d – ємність між струмопровідною шиною і провідною поверхнею ізолятора,

C_e – ємність між провідною поверхнею ізолятора і заземленими частинами КРПЗ,

H – висота ізолятора.

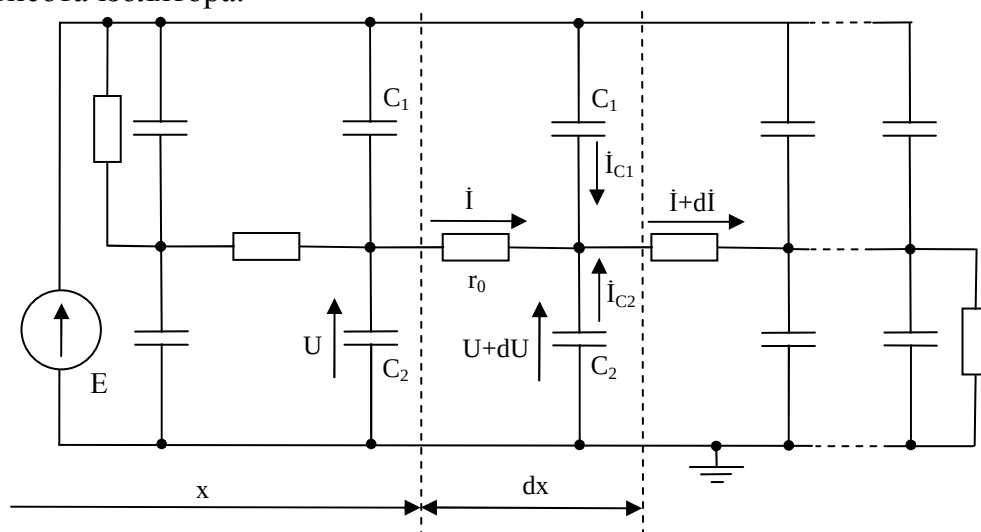


Рис. 1. Схема заміщення забрудненої поверхні ізолятора.

Поверхня високовольтного ізолятора розглядається як така, що складається з великої кількості елементарних комірок нескінченно малої довжини dx , з такими параметрами: активним опором $r_0 dx$, ємністю по відношенню до заземленого фланцу ізолятора і заземлених частин $C_2 dx$ та ємністю по відношенню до шини $C_1 dx$.

Позначимо напругу і струм на початку елементу U і $\dot{I}$, а в кінці $U+dU$ і $\dot{I}+d\dot{I}$ (рис. 1). Спад напруги на елементі dx виразимо, як різницю напруги на початку і в кінці елементу:

$$U - (U + dU) = -dU = \dot{I} r_0 dx \quad (3)$$

Аналогічно струм через елемент dx :

$$\dot{I} - (\dot{I} + d\dot{I}) = -d\dot{I} = -\dot{I}_{C1} - \dot{I}_{C2} = (E - U)j\omega C_1 dx + Uj\omega C_2 dx = Ej\omega C_1 dx + Uj\omega(C_2 - C_1) dx \quad (4)$$

З (3) і (4) отримаємо систему диференціальних рівнянь для поверхневого струму витоку:

$$\begin{cases} -\frac{dU}{dx} = \dot{I} r_0 \\ -\frac{d\dot{I}}{dx} = Ej\omega C_1 + Uj\omega(C_2 - C_1) \end{cases} \quad (5)$$

Вирішуючи (5) відносно $\dot{I}$, отримаємо:

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} = r_0 \dot{I} j\omega(C_2 - C_1) \quad (6)$$

Лінійне диференціальне рівняння (6) має наступний розв'язок [5]:

$$\dot{I} = Ae^{-\gamma x} + Be^{\gamma x} \quad (7)$$

де $\dot{I}$ – комплексний струм на відстані x від початку ізолятора, A і B – постійні коефіцієнти які залежать від висоти ізолятора, питомого опору шару забруднення, погонних ємностей;

γ – коефіцієнт, який характеризує зміну струму вздовж опорного ізолятора і є коренем характеристичного рівняння (6).

$$\gamma = \sqrt{j\omega r_0(C_2 - C_1)}$$

Враховуючи, що з (5):

$$U = \frac{1}{j\omega(C_2 - C_1)} \left(-Ej\omega C_1 - \frac{d\dot{I}}{dx} \right),$$

а

$$-\frac{d\dot{I}}{dx} = -\frac{d(Ae^{-\gamma x} + Be^{\gamma x})}{dx} = \gamma(Ae^{-\gamma x} - Be^{\gamma x}),$$

отримаємо:

$$U = \frac{\gamma}{j\omega(C_2 - C_1)} (Ae^{-\gamma x} - Be^{\gamma x}) - E \frac{C_1}{C_2 - C_1}$$

Визначимо постійні A і B , припускаючи, що напруга на початку опорного ізолятора (біля шини) дорівнює фазній напрузі, тобто при $x=0$ $U=E$, і в кінці ізолятора (біля заземленого фланцу) $x=H$ $U=0$. З врахуванням цього, при $x=0$:

$$A - B = \frac{E}{\gamma} j\omega C_2, \quad (8)$$

при $x=H$:

$$Ae^{-\gamma H} - Be^{\gamma H} = \frac{E}{\gamma} j\omega C_1 \quad (9)$$

Підставивши знайдені з (8), (9) A і B в рівняння (6) отримаємо

$$\dot{I} = \left(\frac{E}{\gamma} j\omega C_2 + \frac{j\omega E}{(e^{-\gamma H} - e^{\gamma H})\gamma} (C_1 - C_2 e^{-\gamma H}) \right) e^{-\gamma x} + \left(\frac{j\omega E}{(e^{-\gamma H} - e^{\gamma H})\gamma} (C_1 - C_2 e^{-\gamma H}) \right) e^{\gamma x} \quad (10)$$

Рівняння (10) показує, як змінюється комплексне значення струму витоку по поверхні ізолятора в залежності від поперечної координати x . Враховуючи те, що струмознімне кільце для вимірювання поверхневого струму витоку знаходиться майже в кінці ізолятора [4], можна прийняти що $x \approx H$. Тоді рівняння (10) набуде виду:

$$\dot{I}_{\text{впз}} = \frac{j\omega E}{\gamma} (C_2 e^{-\gamma H} - \text{cth}(\gamma H) \cdot (C_1 - C_2 e^{-\gamma H})) \quad (11)$$

Підставимо (11) в вираз для загального комплексного струму витоку через поверхню ізолятора (2) отримаємо:

$$\dot{I}_{\text{вп}} = E \left(j\omega C_{\text{п}} + \frac{1}{R_{\text{п}}} \right) + \frac{j\omega E}{\gamma} (C_2 e^{-\gamma H} - \text{cth}(\gamma H) \cdot (C_1 - C_2 e^{-\gamma H})) \quad (12)$$

Підставимо значення E , $C_{\text{п}}$, $R_{\text{п}}$, C_1 , C_2 , γ_0 в рівняння (12) для кількісної оцінки складових, вважаючи, що до ізолятора прикладена фазна напруга $E=6$ кВ.

Визначимо погонні параметри C_1 , C_2 :

$$C_1 = \frac{C_d}{H} = \frac{20 \cdot 10^{-12}}{120} = 0,1667 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/мм}; C_2 = \frac{C_e}{H} = \frac{30 \cdot 10^{-12}}{120} = 0,25 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/мм}$$

При визначенні меж зміни γ_0 врахуємо, що струм витоку по поверхні забрудненого опорного ізолятора КРПЗУ при тривалому прикладенні робочої напруги не перевищує 1 мА [6], тоді:

$$\gamma_{0\text{min}} = \frac{U}{H \cdot I} = \frac{6 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^{-3}} = 50000 \text{ Ом/мм}$$

Підставляючи отримані значення погонних параметрів у (12) та змінюючи $\gamma_0 > \gamma_{0\text{min}}$ побудуємо залежності складових комплексного струму витоку забруднення від погонного активного опору (Рис. 2 і Рис. 3). На Рис. 4. показана залежність відношення реактивної складової до активної в поверхневому струмі забруднення.

Стала ємнісна складова при $C_{\text{п}} \approx 0,1$ пФ

$$\dot{I}_4 = j\omega C_{\text{п}} E = j\omega \cdot 0,1 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 10^3 = j0,19 \cdot 10^{-6} \text{ А},$$

отже струм обумовлений ємністю між фланцем ізолятора і шиною та струмознімальним кільцем має незначне значення і може бути знехтуваний.

Значення поверхневого активного опору для чистої поверхні глазуrowаного фарфору залежить від відносної вологості навколишнього повітря і при відносній вологості $\approx 80\%$ $R_{\text{п}} \approx 10^9$ Ом [7], тоді:

$$\dot{I}_5 = \frac{E}{R_{\text{п}}} = \frac{6 \cdot 10^3}{10^9} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

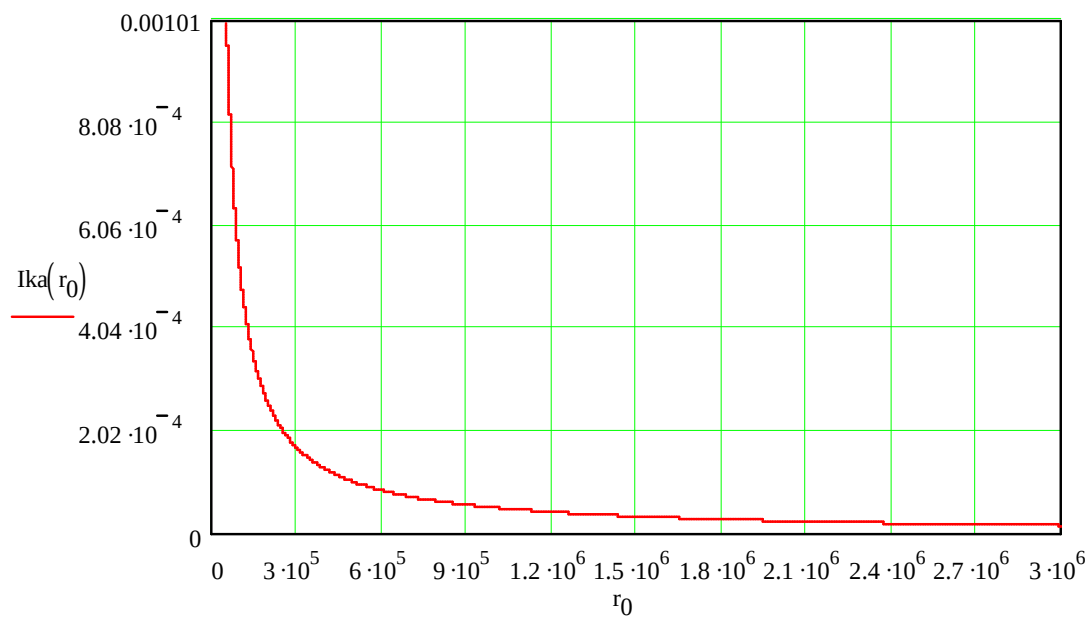


Рис. 2. Графік залежності активної складової поверхневого струму витoku забруднення від погонного активного опору при $C_1=0,1667$ пФ/мм і $C_2=0,25$ пФ/мм.

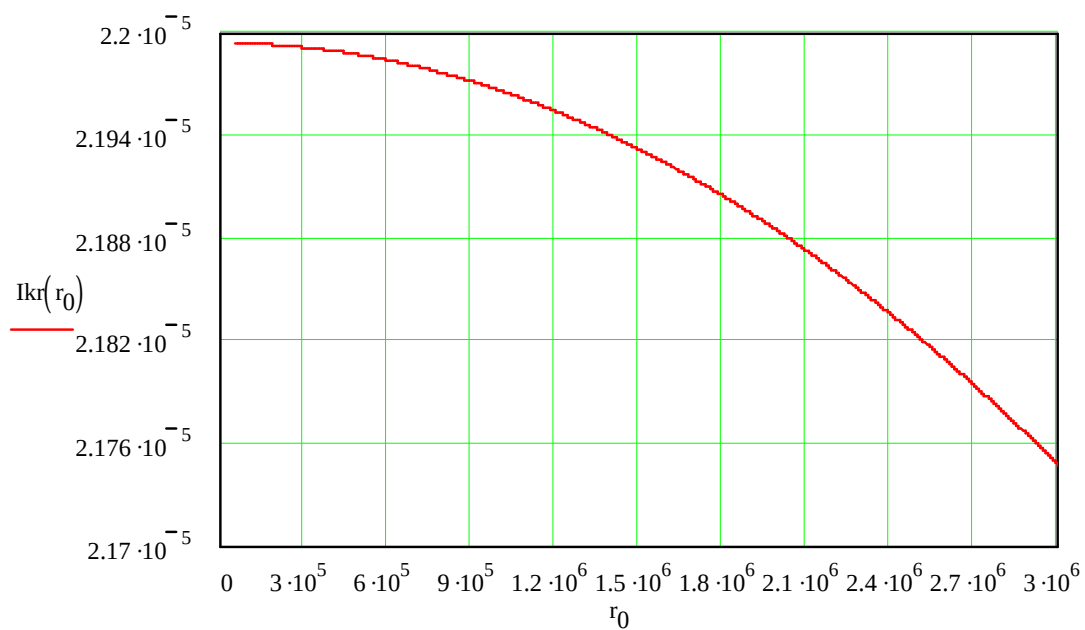


Рис. 3. Графік залежності реактивної складової поверхневого струму забруднення витoku від погонного активного опору при $C_1=0,1667$ пФ/мм і $C_2=0,25$ пФ/мм.

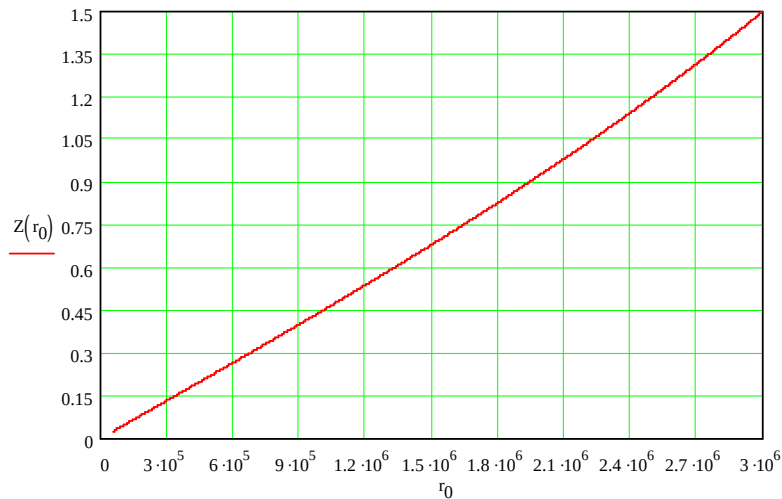


Рис. 4. Графік залежності відношення реактивної складової до активної в поверхневому струмі забруднення від погонного активного опору при $C_1=0,1667$ пФ/мм і $C_2=0,25$ пФ/мм.

По результатах досліджень можна зазначити наступне:

1. Побудована модель струму витоку по поверхні високовольтного ізолятора під напругою з урахуванням ємностей між провідною поверхнею ізолятора і струмопровідною шиною, а також заземленими частинами КРПЗУ, що дозволяє досліджувати вплив опору забруднення на комплексний поверхневий струм витоку.

2. Отримане значення комплексного поверхневого струму витоку має реактивну складову понад 10% від активної при $r_0 > 2,5 \cdot 10^5$ Ом/мм, а це відповідає активному струму що вимірюється меншому 0,2 мА.

3. Струм активної провідності по поверхні чистого твердого діелектрика слід враховувати лише при вимірюванні струму витоку меншого 0,06 мА та відносній вологості більшій за 80%.

Література

1. Орлович А.Ю., Котиш А.І., Серебренніков С.В. Автоматизована система контролю за станом ізоляції в повітряних мережах напругою 10-35 кВ // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. - 2000. - №4. - С.62-65.

2. Серебренніков С.В., Сіріков О.І. Вибір інформативних параметрів для контролю забрудненості високовольтних ізоляторів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, вип. 11: Електромагнітний, ультразвуковий та оптичний неруйнівний контроль матеріалів: Зб. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2006. – 240 с.

3. Патент України №17315 МКП Н02Н 7/26 Спосіб контролю ступеня забрудненості поверхні ізоляторів під напругою /Серебренніков С.В., Сіріков О.І. – надр. 15.09.2006. Бюл. №9.

4. Бугров Я.С., Никольский С.М. Дифференциальное и интегральное исчисление. М.: Наука, 1980. – 432с.

5. Орлович А.Е. Повышение надежности работы сельских комплектных распределительных устройств напряжением 10 кВ: Дис... канд. техн. наук. 05.09.03. - М., 1987. - 223 с.

6. Справочник по электротехническим материалам. Под ред. Корицкого Ю.В., Пасынкова В.В., Тареева Б.М. – Т. 1. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 367 с.