

*С. Ю. ШЕВЧЕНКО, І. І. БОРЗЕНКОВ*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ СТРУМІВ ВИТОКУ ЗА ЗАБРУДНЕНОЇ І ЗВОЛОЖЕНОЇ ПОВЕРХНІ ІЗОЛЯТОРІВ ТИПУ ПС-6Б, ПС-120А, ПСД-70Е ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

В процесі експлуатації ізолятори піддаються багаторазовим забрудненням та атмосферним впливам. Це обумовлюється винесенням забруднень з промислових металургійних підприємств, хімічних комбінатів тощо та осадженням їх на поверхні ізоляторів поблизу ліній електропередачі. У нормальному режимі роботи, коли ізолятори забруднені, але їхня поверхня не піддається зволоженню, активною складовою повного струму витоку можна знехтувати. Інша справа, коли поверхня забрудненого ізолятора інтенсивно зволожується від атмосферних впливів, наприклад, дощ, туман, роса, відповідно і величина активної складової струму витоку також збільшується пропорційно провідності утвореного електроліту, шару забруднення на поверхні ізолюючої поверхні ізолятора. У статті розглянуто спосіб вимірювання струмів витоку по забрудненій поверхні різних типів скляних тарілчастих ізоляторів в лабораторних умовах зі штучним та природним забрудненням. У сухому стані забрудненими ізоляторами протікає струм витоку, який в основному залежить від електричної ємності ізолятора. Запропоновано метод обчислення активної складової струму витоку, оскільки активна складова струму витоку є основним параметром визначення втрат енергії за рахунок її розсіяння в довкілля. Наведено результати зміни величини струмів витоку в часових характеристиках після зволоження поверхневого шару забруднення до струму витоку в сухому стані поверхні ізолятора. Наведено спостереження процесів підсушування забрудненої та зволоженої поверхні від впливу струмів витоку. Досліджено утворення підсушених зон на поверхні забрудненої ізоляції тарілчастих ізоляторів повітряних ліній електропередачі за дії струмів витоку. Проведено аналіз отриманих результатів, зроблено висновки.

**Ключові слова:** струм витоку, активна складова струму витоку, вимірювання струму витоку, ізоляція, ізолятор скляний, повітряна лінія електропередачі.

*S. YU. SHEVCHENKO, I. I. BORZENKOV*

## STUDY OF CHANGES IN LEAKAGE CURRENTS UNDER A CONTAMINATED AND MOISTENED SURFACE OF INSULATORS OF THE PS-6B, PS-120A, PSD-70E TYPES OF OVERHEAD POWER LINES

In the process of operation, insulators are exposed to repeated pollution and atmospheric influences. This is due to the removal of pollutants from industrial metallurgical enterprises, chemical plants and their deposition on the surface of insulators near power transmission lines. In normal operation, when the insulators are dirty, but their surface is not wetted, the active component of the total leakage current can be neglected. It is another matter when the surface of the contaminated insulator is intensively moistened by atmospheric influences, for example: rain, fog, dew, respectively, and the value of the active component of the leakage current also increases in proportion to the conductivity of the formed electrolyte, the layer of contamination on the surface of the insulating surface of the insulator. The article discusses the method of measuring leakage currents on the contaminated surface of various types of glass plate insulators in laboratory conditions, with artificial and natural contamination. In the dry state, a leakage current flows through contaminated insulators, which mainly depends on the electrical capacity of the insulator. A method of calculating the active component of the leakage current is proposed, since the active component of the leakage current is the main parameter for determining energy losses due to its dissipation into the environment. The results of the change in the value of the leakage currents in the time characteristics after wetting the surface layer of pollution to the leakage current in the dry state of the insulator surface are given. The observation of drying processes of a contaminated and moistened surface due to the influence of leakage currents is given. The formation of dried zones on the surface of contaminated insulation of plate insulators of overhead power lines under the action of leakage currents was investigated. An analysis of the obtained results was carried out, conclusions were drawn.

**Keywords:** leakage current, active component of leakage current, measurement of leakage current, insulation, glass insulator, overhead power line.

**Вступ.** Відомо, що для здійснення ізоляційних проміжків системи «фазний провід–траверса опори» повітряних ліній електропередачі в експлуатації використовують високовольтні скляні ізолятори тарілчастого типу. Ізоляція повітряних ліній електропередачі відноситься до зовнішньої ізоляції. Головною функцією лінійної ізоляції є забезпечення достатньої електричної міцності ізоляційних проміжків у місці їх встановлення, а також великих механічних навантажень, які вони здатні витримувати.

У процесі експлуатації ізолятори піддаються багаторазовим забрудненням та атмосферним впливам. Це обумовлюється винесенням забруднень з промислових металургійних підприємств, хімічних комбінатів тощо та осадженням їх на поверхні ізоляторів поблизу ліній електропередачі. У сухому стані забрудненими ізоляторами протікає струм витоку, який в основному залежить від електричної

ємності ізолятора, тобто реактивна складова повного струму витоку. У нормальному режимі роботи, коли ізолятори забруднені, але їхня поверхня не піддається зволоженню, активною складовою повного струму витоку можна знехтувати. Інша справа, коли поверхня забрудненого ізолятора інтенсивно зволожується від атмосферних впливів, наприклад, дощ, туман, роса, і величина активної складової струму витоку, також його ще називають фоновим струмом витоку [1–3], збільшується пропорційно провідності утвореного електроліту шару забруднення на поверхні напруги.

**Аналіз стану проблеми.** З огляду літератури можна відмітити, що багато авторів описують фізичні процеси, які виникають на поверхні забруднених і зволжених ізоляторів, по-різному. Наприклад, у роботах [4, 5] цей процес описують так, що струм витоку нагріває провідний шар, при цьому відбувається випаровування вологи і з'являються

© С. Ю. Шевченко, І. І. Борзенков, 2023

кільцеві підсушені зони з частковими ємностями. У роботі [5] наводиться, що специфіка процесу протікання фоновому струму полягає в тому, що його збільшення призводить до підсушування зволоженої поверхні ізоляторів та подальшого збільшення їх опору, в результаті чого струм стабілізується на певному рівні.

Також під час огляду літератури встановлено, що відрізняються і величини вимірних струмів витоку. Наприклад, у [6] встановлено, що величина тривалого фоновому струму витоку, незалежно від ступеня забруднення, без процесів зволоження знаходиться в діапазоні 0,5–1 мА. У разі появи зволожуючих факторів у перші моменти підвищення вологості амплітуда струму витоку досягає значень 3–5 мА і залежить від ступеня забруднення ізоляції. Також у [7, 8] встановлено, що у граничному разі, коли ізолятори перебувають у передрозрядному режимі, лише амплітуди імпульсів струмів витоку становлять 10 мА і більше. У сильно забруднених районах амплітуди імпульсів струму витоку можуть досягати величини близько 100 мА і більше.

**Мета статті.** Дослідження зміни величини струму витоку у часових характеристиках від ступеня підсушування за рахунок їх протікання по поверхні забрудненого ізолятора, утворення підсушених зон від струмів витоку зволоженого шару забруднення на поверхні тарілчастих скляних ізоляторів різних типів. Дослідити утворення підсушених зон на поверхні забрудненої ізоляції і як ці процеси впливають на зміну величини струму витоку.

**Метод вимірювання струмів витоку в лабораторних умовах.** В лабораторних умовах для вимірювання струмів витоку можна скористатися вимірювальною схемою, яка наведена у роботах [9, 10]. Вимірювальна схема струмів витоку представлена на рис. 1.

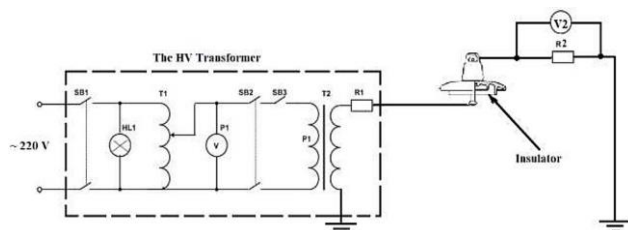


Рисунок 1 – Вимірювальна схема струмів витоку

У схемі (рис. 1) як джерело високої напруги використовується високовольний випробувальний трансформатор типу АИ-70. До високовольного виводу трансформатора підключено вивід «пін» об'єкта випробуваного тарілчастого ізолятора. До шапки ізолятора послідовно включений резистор R2 з номінальним опором 20 Ом з потужністю розсіювання 500 Вт. При подачі високої напруги на об'єкт дослідження така схема вимірювання не призводить до великих похибок, оскільки падіння напруги на резисторі R2 становить близько 2 В при струмі витоку в 100 мА [10].

На об'єкти дослідження з виводу високовольного трансформатора подається напруга величиною 10 кВ промислової частоти 50 Гц. За вимірювання струмів витоку в якості вимірювального шунта R2 (рис. 1) доцільно використовувати опір з номінальним значенням 38–40 кОм, оскільки струми витоку мають малі значення порядку 150–250 мкА. Як реєструвальний пристрій вимірювання падіння напруги на R2 замість вольтметра V2 (рис. 1) доцільніше використовувати електронний осцилограф. При цьому об'єкт дослідження повинен бути добре ізольований, тобто ніби «висіти в повітрі». Для цих цілей він був підвішений до стрижневого полімерного ізолятора 110 кВ, який, у свою чергу, перпендикулярно був підвішений до ізолюючої оперативної штанги (рис. 2).

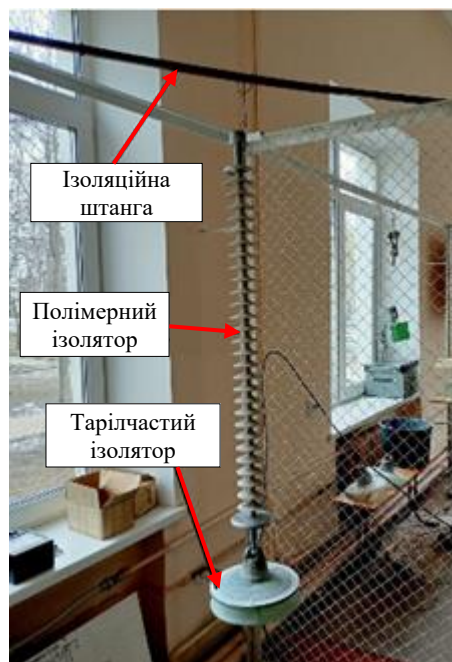


Рисунок 2 – Загальний вигляд виконання ізоляції тарілчастого ізолятора

Як штучний забруднювач використовувався розчин каоліну, відповідно до стандарту [11]. Випробувані ізолятори попередньо занурювалися в цей розчин і протягом доби їм давали просохнути. Ізолятор із природним забрудненням типу ПС-120Б (рис. 3) був знятий з діючої лінії електропередачі.

Як штучний зволожувач використовувався розпилювач з дрібнодисперсними краплями дистильованої води для імітації туману, що випав, або роси, оскільки такий вид зволоження є найнебезпечнішим і знижує електричну міцність ізоляторів. Зволоження шару забруднення проводилося тільки по верхній гладенькій частині тарілки ізолятора, оскільки більшість гірлянд ізоляторів на лініях електропередачі підтримуючого типу.



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд природно забрудненого ізолятора типу ПС-120Б

**Результати досліджень.** Досліджуваними об'єктами були обрані ізолятори типів ПС-120А, ПС-6Б, ПСД-70Е. Причому ізолятор ПС-120А мав природне забруднення, а ізолятори ПС-6Б та ПСД-70Е штучно забруднювалися за допомогою розчину каоліну. Для подальшого аналізу зміни струмів витoku було побудовано графіки залежності струму витoku до часу прикладеної напруги. Кожен ізолятор зі штучним та природним забрудненнями поступово змочувався до насичення шару забруднення. Час реєстрації зміни струмів витoku відповідав 20 хв. Для кожного ізолятора було проведено по 5 таких вимірів у 20 повторах. Графіки залежності зміни повного струму витoku наведено (рис. 4 а-в).

З графіків видно, що повний струм витoku штучно забрудненої поверхні ізоляторів (рис. 4 а, б) має менший розкид характеристик, ніж за природного забруднення (рис. 4 в). Також з графіків можна помітити, що існують точки різкого зниження струму витoku (рис. 4 а, б) і вони з'являються практично в тому самому часовому проміжку. Ще цікавий той факт, що на ізоляторі ПСД-70Е в інтервалі 20 хвилин струми витoku практично доходять до лінії струму витoku в сухому стані (рис. 4 а). За природного забруднення поверхні ізолятора рис. 4 в видно великий розкид характеристик і немає точки різкого спаду – це можна пояснити тим, що забруднення має різний хімічний склад і фізичні процеси, які протікають в шарі забруднення, мають інший характер, ніж при штучному забрудненні.

В ході експерименту було помічено, що через деякий час – приблизно 8–9 хвилин від початку подачі напруги – на поверхні ізолятора ПСД-70Е чітко було видно, як за рахунок струмів витoku відбувається підсушування шару забруднення. Спочатку з'являється один острівець діаметром приблизно 0,5 см ближче до шапки ізолятора на відстані 1–1,5 см від неї, потім цей острівець починає збільшуватися у розмірі (рис. 5).

Приблизно через 1–2 хвилини з іншого боку з'являється ще один острівець, який теж з часом збільшується в розмірі і на ньому з'являються відростки, які спрямовані у бік першого острівця. Ще через деякий час з'являється третій і четвертий

острівці, в той час як перший і другий збільшилися в розмірі і практично з'єдналися. Такі процеси на поверхні тривають доки всі ці ділянки не з'єднуються повністю в єдине ціле і утворюється кільце (рис. 6). Це зазначено на графіках як точка різкого зменшення струму витoku (рис. 4 а, б).

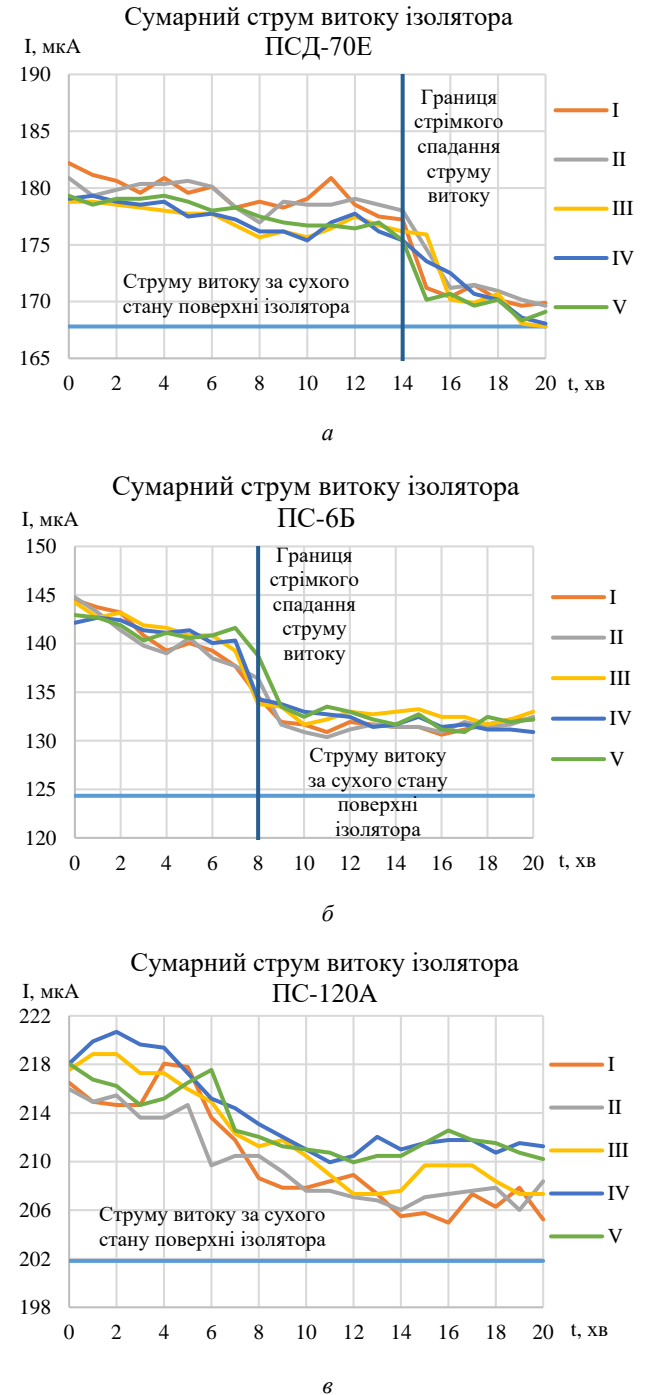


Рисунок 4 – Графіки залежності зміни струму витoku по забрудненій та зволоженої поверхні від часу прикладеної напруги:

а – ізолятор ПСД-70Е;  
б – ізолятор ПС-6Б;  
в – ізолятор ПС-120А



Рисунок 5 – Загальний вид утворення підсушеної зони від впливу струмів витоку



Рисунок 6 – Загальний вигляд підсушеної кільцевої зони від струмів витоку

Якщо це спостереження порівнювати зі спостереженнями інших авторів, які стверджують, що при зволоженні забрудненого ізолятора за рахунок зростання струму витоку нагрівається провідний шар, відбувається випаровування вологи і з'являються кільцеві підсушені зони з частковими ємностями [12, 13], то в ході проведення вищевикладеного експерименту спостерігалася інша картина того, що відбувається – ніяких кільцевих зон не спостерігалася, тим паче кількісно.

Виходячи з вище представлених даних, які представлені на графіках зміни струму витоку (рис. 4 а-в), можна побачити, що струм витоку за прикладеної напруги 10 кВ коливається в діапазоні 150-250 мкА, причому це значення повного струму витоку. Така різниця величини струмів витоку, можна припустити, обумовлюється ходом проведення експериментів різними дослідниками, тобто способом забруднення та зволоження певної частини ізолятора або всього ізолятора та амплітудою напруги, що подається на об'єкт випробування. Також у ході проведення експериментів з осцилограми було встановлено, що пікові значення амплітуди струму витоку мають аперіодичний характер. Ці пікові значення струму зникають, коли утворюється кільцева зона на поверхні тарілки ізолятора.

**Метод розрахунку активної складної струму витоку.** У процесі експлуатації тарілчасті ізолятори збираються в гірлянди ізоляторів [14]. Кількість

ізоляторів у гірлянді залежить від номінальної напруги лінії електропередачі, а також від ступеня забруднення атмосфери та типу ізолятора. Напруга між ізоляторами гірлянди розподіляється нерівномірно. Причину нерівномірності можна пояснити за допомогою спрощеної схеми заміщення (рис. 7), де  $C_{insulator}$  – власна ємність кожного ізолятора, яка лежить у діапазоні 40–70 пФ;  $C_{ground}$  – ємність металеві арматури ізолятора щодо землі, 4–5 пФ;  $C_{wire}$  – ємність відносно дроту повітряної лінії електропередачі, 0,5–1,0 пФ [15].

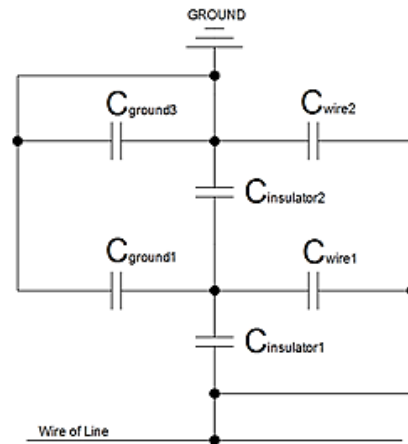


Рисунок 7 – Схема заміщення гірлянди ізоляторів

При зволоженні забруднених ізоляторів розподіл напруги вздовж гірлянди суттєво змінюється. У схему заміщення необхідно ввести опір струму витоку по поверхні ізолятора  $R_{insulator}$  (рис. 8). При чистій та сухій поверхні ізолятора активний опір набагато більше ємнісного, тому розподіл напруги залежить тільки від ємностей  $C_{insulator}$ ,  $C_{wire}$ ,  $C_{ground}$ . При забрудненні та зволоженні поверхні ізоляторів розподіл напруги вздовж гірлянди залежить головним чином від опору струму витоку.

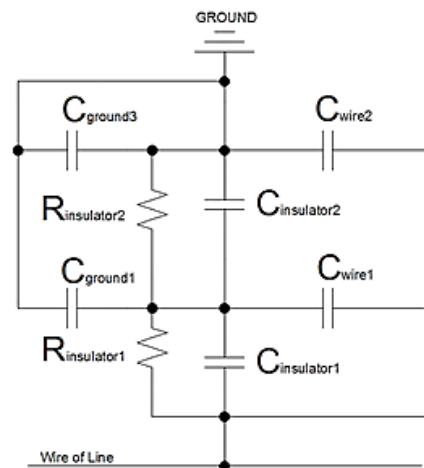


Рисунок 8 – Схема заміщення гірлянди ізоляторів із опором струму витоку  $R_{insulator}$

В лабораторних умовах для вимірювання струмів витоку досліджується один ізолятор, тому схему заміщення ізоляторів, наведену на рис. 8, можна



спростити до схеми заміщення одного ізолятора (рис. 9).

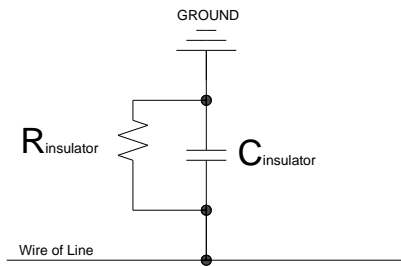


Рисунок 9 – Схема заміщення одного ізолятора

Якщо припустити, що електрична ємність ізолятора  $C_{\text{insulator}}$  відома чи виміряна будь-яким відомим способом, легко можна обчислити реактивний опір ізолятора використовуючи формулу:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (1)$$

де  $\omega$  – циклічна частота;  $C$  – ємність ізолятора, пФ.

Використовуючи закон Ома легко обчислити діюче значення реактивного струму витоку, тобто:

$$I_r = \frac{U}{X_C} \quad (2)$$

де  $U$  – діюче значення напруги, що додається до ізолятора.

Побудувавши векторну діаграму струмів (рис. 10) можна обчислити діюче значення активної складової струму витоку.

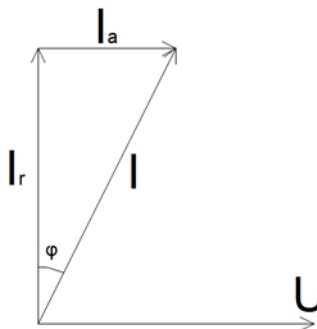


Рисунок 10 – Векторна діаграма визначення повного струму витоку

З векторної діаграми (рис. 10) можна записати, що повний струм витоку з теореми Піфагора дорівнюватиме:

$$I^2 = I_r^2 + I_a^2 \quad (3)$$

де  $I$  – діюче значення повного струму витоку, А;

$I_r$  – діюче значення реактивної складової струму витоку, А;

$I_a$  – діюче значення активної складової струму витоку, А.

Тоді з рівняння (3), виразивши  $I_a$ , отримаємо чинне значення активної складової струму витоку;

$$I_a = \sqrt{I^2 - I_r^2}.$$

Поданий метод дозволяє вимірювати діючі значення повного струму витоку з наступним простим перерахунком активної складової струму витоку. Вимірювання електричної ємності ізоляторів можна проводити, наприклад, з використанням мостів Шерінга або RLC метрів.

**Висновки.** Дослідження забруднених ізоляторів показує, що вони мають різні характеристики зміни струму витоку. Природньо забруднений ізолятор має інший хімічний склад забруднення, ніж у штучно забрудненого ізолятора. Залежно від конструкції та типу ізолятора тривалість відновлення струму витоку до струму витоку сухого стану різна, це залежить від конструктивного виконання конкретного ізолятора.

У сухому стані через ізолятор протікає реактивна складова струму витоку та його величина залежить від електричної ємності ізолятора. При зволоженні забрудненого ізолятора з'являється активна складова струму витоку за рахунок збільшення провідності шару забруднення. Відповідно повний струм витоку збільшується на величину активної складової, оскільки умовно можна припустити, що електрична ємність ізолятора в процесі зволоження не змінюється.

Виділивши за наведеним вище методом активну складову струму витоку можна зробити висновок, що значення його набагато менше, ніж наведені значення іншими авторами. Це можна пояснити різницею способів проведення експериментів, способів забруднення та зволоження ізоляторів.

Характер поведінки підсушування зволжених зон забруднення має інший характер, ніж представлений іншими авторами. Струм витоку навіть після його різкого спаду, коли на поверхні тарілки утворюється кільцева зона, залишається вищою, ніж струм витоку сухого ізолятора.

### Список літератури

1. Borzenkov I., Danylchenko D., Shevchenko S., Lebedinsky I., Zahorodnia T. Investigation of the leakage current of the suspend dish insulator of type PSD-70E in various conditions. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. P. 98–101. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263113>.
2. Huang J., Liu K., Zeng D., Zhang Z. An online measurement method for insulator creepage distance on transmission lines. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 7. P. 1781. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11071781>.
3. Park J.-Y., J.-K. Lee, B.-H. Cho, K. -Y. Oh Development of insulator diagnosis algorithm using least-square approximation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012. Vol. 27, no. 1. P. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrdr.2011.2173357>.
4. Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання. Чинний від 2014-01-01. Вид. офіц. Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2013.
5. Александров Г. Н., Иванов В. Л., Кизеветтер В. Е. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. Ленинград : Энергия, 1969. 269 с.
6. Ramirez I., Hernandez R., Montoya G. Measurement of leakage current for monitoring the performance of outdoor insulators in polluted environments. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2012.

- Vol. 28, no. 4, P. 29–34. DOI: <https://doi.org/10.1109/mei.2012.6232007>.
- Мерхалев С. Д., Соломоник Е. А. Изоляция линий и подстанций в районах с загрязненной атмосферой. Ленинград : Энергия, 1973. 160 с.
  - Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пингаль Ю. С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах. 3-е изд. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 464 с.
  - Shevchenko S., Danylchenko D., Borzenkov I. Determination of power losses in the isolation of distribution networks. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 56. P. 107–111. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424x-2019-3-56-107-111>.
  - Борзенков І. І., Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О. Спосіб визначення струму витoku по поверхні тарільчастого ізолятора типу ПФ-70А. *Фізика, електроніка, електротехніка ФЕЕ :: 2019* : Матеріали та програма науково-технічної конференції, м. Суми, Україна, 23–26 квіт. 2019 р. С. 130–131.
  - IEC 60507:2013. Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems. Official edition. 2013. 77 p.
  - Борзенков І. І., Данильченко Д. О., Лебединський І. Л., Обухов В. Р., Шевченко С. Ю. Огляд методів діагностики електричних характеристик ізоляційних конструкцій повітряних ліній електропередач. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2019. № 29(1354). С. 21–26.
  - Борзенков І. І., Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О., Лебединський І. Л., Загородня Т. М. Уточнення параметрів схеми заміщення лінійного ізолятора з забрудненою поверхнею. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2021)»* : збірник наукових праць, м. Харків, Україна, 9–12 листоп. 2021 р. С. 35–36.
  - Шевченко С. Ю., Борзенков І. І., Данильченко Д. О., Лебединський І. Л., Лебедка С. М. Определение потерь энергии в линейных тарельчатых изоляторах за счет определения тгδ и выделения активной составляющей тока утечки. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. 2019. № 203. С. 61–63.
  - Борзенков І. І., Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О. Аналіз визначення втрат енергії від струмів витoku по ізоляторам повітряних ліній. *III Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2019)»* : збірник наукових праць, м. Харків, Україна, 12–15 листоп. 2019 р. С. 44–45.
  - Metodychni rekomendatsii vyznachennia tekhnolohichnykh vytrat elektrychnoi enerhii v transformatorakh i liniiahk elektroperedavannia [Methodological recommendations for determining the technological consumption of electricity in transformers and power lines]*, Kyiv, 2013. (in Ukrainian)
  - G. N. Aleksandrov, V. L. Ivanov, and V. E. Kizeveter, *Elektricheskaia prochnost naruzhnoi vysokovoltnoi izoliatsii [Electrical strength of the external high voltage insulation]*. Leningrad: Energiia, 1969. (in Russian)
  - I. Ramirez, R. Hernandez, and G. Montoya, “Measurement of leakage current for monitoring the performance of outdoor insulators in polluted environments,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, no. 4, pp. 29–34, 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/mei.2012.6232007>.
  - S. D. Merkhalev and E. A. Solomonik, Izoliatsiia liniy i podstantsii v raionakh s zagriaznennoi atmosferei [Isolation of lines and substations in areas with polluted atmosphere]. Leningrad: Energiia, 1973. (in Russian)
  - V. V. Bazutkin, V. P. Larionov, and Iu. S. Pinal, *Tekhnika vysokikh napriazhenii: Izoliatsiia i perenapriazheniia v elektricheskikh sistemakh [High voltage engineering: Insulation and overvoltages in the electrical systems]*, 3rd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1986. (in Russian)
  - S. Shevchenko, D. Danylchenko, and I. Borzenkov, “Determination of power losses in the isolation of distribution networks,” *Lighting Engineering & Power Engineering*, vol. 3, no. 56, pp. 107–111, 2019, doi: <https://doi.org/10.33042/2079-424x-2019-3-56-107-111>.
  - I. I. Borzenkov, S. Yu. Shevchenko, and D. O. Danylchenko, “Sposib vyznachennia strumu vytku po poverkhni tarilchastoho izoliatoru typu PF-70A [Method for determining the leakage current on the surface of a plate insulator of the PF-70A type],” in *Physic. Electronics. Electrical Engineering :: 2019*, Sumy, Ukraine, Apr. 23–26, 2019. pp. 130–131. (in Ukrainian)
  - Artificial Pollution Tests on High-Voltage Ceramic and Glass Insulators to Be Used on a.c. Systems*, IEC 60507:2013, 2013.
  - I. Borzenkov, D. Danylchenko, I. Lebedynskiy, V. Obukhov, O. Sobchenko, and S. Shevchenko, “Overview of diagnostic methods of electrical characteristics of insulation structures of electric transmission overhead power lines,” *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 29(1354), pp. 21–26, 2019. (in Russian)
  - I. I. Borzenkov, S. Yu. Shevchenko, D. O. Danylchenko, I. L. Lebedynskiy, and T. M. Zahorodnia, “Utochnennia parametriv skhemy zamishchennia liniinoho izoliatora z zabrudnenoiu poverkhneiu, [Refining the parameters of a replacement circuit for a linear insulator with a contaminated surface]” in V International Scientific and Technical Conference “Energy Efficiency and Energy Security of Electric Power Systems (EEES-2021)”, Kharkiv, Ukraine, Nov. 9–12, 2021. pp. 35–36. (in Ukrainian)
  - S. Yu. Shevchenko, I. V. Borzenkov, D. O. Danylchenko, I. L. Lebedynskiy, and S. M. Lebedka, “Determination of losses of energy in linear plate insulators by determining tgδ and selecting the active component of leakage current,” *Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture*, no. 203, pp. 61–63, 2019. (in Russian)
  - I. I. Borzenkov, S. Yu. Shevchenko, and D. O. Danylchenko, “Analiz vyznachennia vtrat enerhii vid strumiv vytku po izoliatoram povitrianykh liniy [Analysis of determining energy losses from leakage currents through overhead line insulators],” in *III International Scientific and Technical Conference “Energy Efficiency and Energy Security of Electric Power Systems (EEES-2019)”*, Kharkiv, Ukraine, Nov. 12–15, 2019. pp. 44–45. (in Ukrainian)

## References

- I. Borzenkov, D. Danylchenko, S. Shevchenko, I. Lebedinsky, and T. Zahorodnia, “Investigation of the leakage current of the suspend dish insulator of type PSD-70E in various conditions,” in *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, Sep. 7–11, 2020. pp. 98–101, doi: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263113>.
- J. Huang, K. Liu, D. Zeng, and Z. Zhang, “An online measurement method for insulator creepage distance on transmission lines,” *Energies*, vol. 11, no. 7, p. 1781, Jul. 2018. Accessed: Jun. 17, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/en11071781>.
- J.-Y. Park, J.-K. Lee, B.-H. Cho, and K.-Y. Oh, “Development of insulator diagnosis algorithm using least-square approximation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 1, pp. 3–12, Jan. 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2011.2173357>.

Надійшла (received) 16.06.2023

## Відомості про автора (-іє) / About the Author (-s)

**Шевченко Сергій Юрійович (Sergey Shevchenko)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: [Sergii.Shevchenko@khpri.edu.ua](mailto:Sergii.Shevchenko@khpri.edu.ua).

**Борзенков Ігор Іванович (Igor Borzenkov)** – Сумський державний університет, асистент кафедри електроенергетики; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7775-9571>; e-mail: [i.borzenkov@etech.sumdu.edu.ua](mailto:i.borzenkov@etech.sumdu.edu.ua).