

С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО, Р. О. ГАНУС, В. В. ВАРВ'ЯНСЬКА

МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ВОЛОГОРОЗРЯДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІЗОЛЯТОРІВ.

У статті представлено детальний аналіз та порівняння методів розрахунку вологорозрядної напруги ізоляторів. Початкова частина роботи присвячена короткому огляду принципів, що лежать в основі розряду у повітрі вздовж поверхні ізоляторів, що є ключовим аспектом для розуміння вологорозрядних процесів. Розглядаються дві основні методики розрахунку вологорозрядної напруги. Перша методика базується на формулі Теплера, яка потребує використання специфічних вихідних даних, що можуть бути отримані лише експериментально. Цей підхід, хоч і є класичним, утруднює його практичне застосування через складність отримання необхідних параметрів у реальних умовах. Друга методика, описана у літературі, опирається на загальнодоступні дані, що значно спрощує процес розрахунку. На основі цієї методики було створено автоматизований інструмент для розрахунку вологорозрядних характеристик ізоляторів. Використання цього інструменту дозволяє знизити залежність від експериментальних даних, забезпечуючи точні результати з мінімальними витратами часу та ресурсів. Для ілюстрації ефективності запропонованого інструменту було проведено розрахунок вологорозрядних характеристик для ізолятора типу ЛК 70-110. За результатами аналізу, вологорозрядна напруга для цього ізолятора становить 549 кВ, а напруженість – 2,1 кВ на сантиметр довжини шляху струму витoku. Ці показники співпадають з середніми значеннями, отриманими за допомогою першої методики, що підтверджує надійність і точність нової методики. Зроблені висновки свідчать про те, що друга методика розрахунку є повністю задовільною для стандартних розрахунків ізоляторів. Вона також може бути застосована у специфічних умовах, таких як підземні підстанції, де точність і оперативність є критично важливими. Таким чином, запропонована методика розрахунку може стати ефективним інструментом для інженерів та науковців, що займаються проектуванням та аналізом ізоляційних систем. Ця робота робить значний внесок у розробку та вдосконалення методів оцінки вологорозрядних характеристик ізоляторів, що є важливим кроком до підвищення надійності електричних мереж та безпеки їх експлуатації.

Ключові слова: вологорозрядна напруга, ізолятори, методика розрахунку, формула Теплера, електричні розряди, автоматизований інструмент розрахунку.

S. YU. SHEVCHENKO, D. O. DANYLCHENKO, R. O. HANUS, V. V. VARVIANSKA

METHODS FOR CALCULATING THE MOISTURE DISCHARGE CHARACTERISTICS OF INSULATORS

This paper presents a detailed analysis and comparison of methods for calculating the moisture discharge voltage of insulators. The initial section provides a brief overview of the principles underlying air discharge along the surface of insulators, which is crucial for understanding moisture discharge processes. Two primary calculation methods for moisture discharge voltage are considered. The first method is based on Tepler's formula, which requires specific input data that can only be obtained experimentally. Although this approach is classical, it complicates practical application due to the difficulty of acquiring the necessary parameters under real-world conditions. The second method, described in the literature, relies on readily available data, significantly simplifying the calculation process. Based on this method, an automated tool for calculating the moisture discharge characteristics of insulators has been developed. The use of this tool reduces dependency on experimental data, providing accurate results with minimal time and resource expenditure. To demonstrate the effectiveness of the proposed tool, a moisture discharge characteristic calculation was performed for the insulator type LK 70-110. According to the analysis results, the moisture discharge voltage for this insulator is 549 kV, with a stress of 2.1 kV per centimeter of leakage current path length. These figures align with the average values obtained using the first method, confirming the reliability and accuracy of the new approach. The conclusions indicate that the second calculation method is fully satisfactory for standard insulator calculations. It can also be applied in specific conditions, such as under-chemo-substations, where precision and efficiency are critically important. Thus, the proposed calculation method can become an effective tool for engineers and researchers involved in the design and analysis of insulation systems. This work significantly contributes to the development and improvement of methods for assessing the moisture discharge characteristics of insulators, representing an essential step towards enhancing the reliability and safety of electrical networks and their operation.

Keywords: moisture-discharge voltage, insulators, calculation method, Tepler's formula, electrical discharges, automated calculation tool.

Вступ. Ізолятори відіграють критично важливу роль в електричних мережах, забезпечуючи розділення струмопровідних частин та підтримуючи їхню функціональність навіть у складних умовах експлуатації. Однією з найбільш поширених проблем, що виникають при їх використанні, є явище вологорозряду [1]. Вологорозрядні напруги можуть суттєво знижувати ефективність ізоляції, призводячи до збоїв у роботі електричних систем. Тому правильний розрахунок цих напруг є ключовим аспектом для проектування надійних ізоляційних систем [2]. Ця стаття присвячена аналізу та порівнянню двох методик розрахунку вологорозрядної напруги, зокрема, оцінці їхньої практичної застосовності та точності для використання в підземних підстанціях.

Мета статті. Метою даної роботи є порівняння двох методик розрахунку вологорозрядної напруги ізоляторів: методики, заснованої на формулі Теплера,

та альтернативної методики, яка використовує загальнодоступні дані. Основна увага приділяється розробці та верифікації автоматизованого інструменту для розрахунку вологорозрядних характеристик ізоляторів. Крім того, стаття ставить за мету визначити, наскільки новий підхід може замінити класичний метод у практичних умовах та сприяти розробці нормативів для підземних підстанцій.

Розряд у повітрі вздовж поверхні ізоляторів. Розглянемо вплив твердого діелектрика на виникнення і розвиток розряду в повітрі вздовж поверхні ізолятора. У конструкції (на рис. 1 а) силові лінії електричного поля паралельні до поверхні діелектрика і поле однорідне. У конструкції (на рис. 1 б) поле неоднорідне і тангенціальна складова напруженості поля на поверхні діелектрика E_t переважає над нормальною складовою E_n . У конструкції (на рис. 1 в) поле також неоднорідне, але переважає нормальна складова.

© С. Ю. Шевченко, Д. О. Данильченко, Р. О. Ганус, В. В. Варв'янська, 2024

Перша конструкція порівняно рідко трапляється в реальних умовах, але зручна під час виявлення впливу характеристик діелектрика на виникнення розряду, друга і третя конструкції трапляються часто (опорні та прохідні ізолятори).

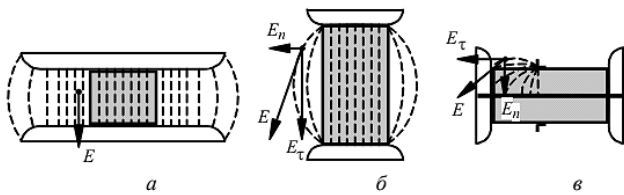


Рисунок 1 – Характерні конструкції повітряних проміжків із твердим діелектриком

В ізоляційній конструкції електрична міцність проміжку з діелектриком менша, ніж міцність чисто повітряного проміжку. Це пов'язано з адсорбцією вологи з навколишнього повітря на поверхні діелектрика, а також із мікропроміжками між твердим діелектриком і електродом. Поверхня всіх тіл у вологому повітрі покрита найтоншою плівкою води. Іони, що утворюються в цій плівці під дією електричного поля, переміщуються до електродів. У результаті цього поле поблизу електродів посилюється, а в середині проміжку – послаблюється. Посилення поля біля електродів призводить до зниження електричної міцності проміжку. Це зниження тим більше, чим гігроскопічніший діелектрик.

Наприклад, скло є більш гігроскопічним матеріалом, ніж глазурована порцеляна, тому напруга перекриття вздовж поверхні скла нижча, ніж уздовж порцеляни.

Зменшення напруги перекриття ізолятора за наявності мікрозазору між діелектриком і електродом або мікротріщини на поверхні діелектрика пов'язане зі збільшенням у них напруженості поля внаслідок відмінності діелектричних проникностей повітря і твердого діелектрика (діелектрична проникність твердого діелектрика в 3–4 рази більша, ніж повітря). Збільшення напруженості поля до мікрозазорів призводить до виникнення там іонізаційних процесів, продукти яких (іони та електрони), потрапляючи в основний проміжок, створюють місцеве посилення поля, що призводить до зменшення напруги перекриття.

Для збільшення розрядної напруги проміжку з твердим діелектриком прагнуть використовувати малогігроскопічні діелектрики або створити покриття з малогігроскопічних матеріалів, що захищають діелектрик від контакту з парами води (наприклад, глазурування поверхні порцеляни), а також забезпечити надійне, без мікрозазорів, сполучення тіла ізолятора з металевою арматурою, використовуючи цементні закладені та еластичні провідні прокладки.

В ізоляційній конструкції (див. рис. 1 б) поле неоднорідне, отже, як і в разі чисто повітряного проміжку, розрядна напруга менша, ніж в однорідному полі. Вплив гігроскопічності діелектрика і мікропроміжків тут якісно такий самий, як і в

конструкції на рис. 1 а, але він слабкіше виражений, тому що електричне поле і без того істотно неоднорідне. За досить великої неоднорідності поля в цій ізоляційній конструкції, як і в чисто повітряному проміжку, виникає коронний розряд. Утворені при цьому озон і оксиди азоту впливають на твердий діелектрик. Найбільшу небезпеку коронний розряд становить для полімерної ізоляції, особливо якщо він має стримерну форму. Температура в каналі стримера досить висока, і зіткнення його з поверхнею діелектрика може призводити до термічного розкладання діелектрика й утворення обугленого сліду (треку) з часом зростає, що призводить до перекриття ізолятора з незворотною втратою ним електричної міцності.

Усе сказане справедливо і для конструкції на рис. 1 в. Велика нормальна складова електричного поля сприяє зближенню каналу стримера з поверхнею діелектрика, що підвищує ймовірність пошкодження діелектрика. Електрична міцність цієї конструкції ще менша, ніж конструкція на рис. 1 б. Канали стримерів, що розвиваються вздовж поверхні діелектрика, мають значно більшу ємність щодо внутрішнього (протилежного) електрода, ніж у конструкції з переважанням тангенціальної складової поля. Тому через стримерні канали проходить порівняно великий струм. За певного значення напруги струм зростає настільки, що температура стримерних каналів стає достатньою для термічної іонізації. Термічно іонізований канал розряду, що розвивається вздовж діелектрика, на поверхні якого нормальна складова напруженості поля перевищує тангенціальну складову, називають каналом ковзного розряду.

Провідність каналу ковзного розряду значно більша за провідність каналу стримера, тому падіння напруги в каналі ковзного розряду менше, а на неперекритій частині проміжку – більше, ніж у каналах стримера. Збільшення напруги на неперекритій частині проміжку призводить до подовження каналу ковзного розряду і повного перекриття проміжку за меншого значення напруги між електродами.

Довжина каналу ковзного розряду залежить від його провідності, а отже, від значення струму в ньому. Своєю чергою, струм залежить від напруги між електродами, зміни напруги та ємності каналу стримера щодо протилежного електрода. Вплив цих параметрів відображено в емпіричній формулі Теплера, згідно з якою довжина каналу ковзного розряду [3]:

$$l_{\text{ков}} = \chi_1 \cdot C^2 \cdot U^{5.4} \sqrt{\frac{dU}{dt}}, \quad (1)$$

де χ_1 – коефіцієнт, що визначається дослідним шляхом;

C – питома поверхнева ємність (ємність поверхні діелектрика, за якою розвивається розряд відносно протилежного електрода);

U – прикладена напруга.

З формули (1), при підстановці замість $I_{ков}$ відстані між електродами по поверхні діелектрика L , можна визначити значення напруги U_p , необхідної для перекриття ізолятора. Якщо ж прийняти $C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}$, де d – товщина діелектрика, а площа S прийнята рівною 1 см^2 , та рахувати значення $\frac{dU}{dt}$ постійним, що в першому наближенні відповідає постійності частоти прикладеної напруги, з формули (1) отримаємо рівняння для пошуку розрядної напруги, яке називається формулою Теплера:

$$U_p = \chi \cdot L^{0,2} \left(\frac{d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \right)^{0,4}. \quad (2)$$

З формули Теплера випливає, що зростання довжини ізолятора дає відносно мале підвищення розрядної напруги. Тому для збільшення розрядних напруг прохідних ізоляторів зменшують питому поверхневу ємність шляхом збільшення діаметра ізолятора біля фланця, з якого можна очікувати розвитку розряду. Використовують також нанесення біля фланця напівпровідникового покриття, що сприяє вирівнюванню розподілу напруги поверхнею ізолятора і, отже, призводить до збільшення розрядних напруг.

За постійної напруги питома поверхнева ємність практично не впливає на розвиток розряду і значення розрядної напруги виявляється близьким до розрядної напруги чисто повітряного проміжку.

Розряд уздовж провідної та забрудненої поверхні ізолятора. В умовах експлуатації поверхні ізоляторів завжди забруднюються. Як правило, сухі забруднення, що мають високий опір і не впливають на розподіл напруги по поверхні ізолятора, не знижують помітно його розрядної напруги. Зволоження шару забруднення дрібним дощем або росойою призводить до зменшення опору шару забруднення, зміни розподілу напруги по поверхні ізолятора і в результаті – до зниження його розрядної напруги.

Механізми перекриття ізолятора під дощем і за забрудненої та зволоженої поверхні подібні. Розглянемо розвиток розряду у випадку, коли поверхня ізолятора забруднена і зволожена.

Під дією прикладеної до ізолятора напруги по зволоженому шару забруднення проходить струм витоку, що нагріває його. Оскільки забруднення розподілене по поверхні ізолятора нерівномірно і щільність струму витоку неоднакова на окремих ділянках ізолятора через складну конфігурацію його поверхні, то нагрівання шару забруднення відбувається також нерівномірно. На тих ділянках ізолятора, де щільність струму найбільша, відбувається інтенсивне випаровування води й утворюються підсушені ділянки з підвищеним опором. Розподіл напруги по поверхні ізолятора змінюється. Майже вся напруга, що впливає на ізоляцію, виявляється прикладеною до підсушених ділянок. У результаті цього підсушені ділянки перекриваються іскровими каналами, званими частковими переміжними дугами. Опір іскрового каналу менший за опір підсушеної ділянки поверхні ізолятора, тому струм витоку зростає. Зростання

струму витоку призводить до подальшого підсушування шару забруднення, а отже і до збільшення його опору.

Інтенсивне підсушування поверхні ізолятора біля кінців дуг призводить до їх подовження. Підсушування всієї поверхні веде до зниження струму витоку, а збільшення довжини часткових дуг – до його зростання. Якщо результатом цього буде зменшення струму витоку, то дуги згаснуть, якщо ж струм витоку зростатиме, то часткові дуги подовжуватимуться і перекриють весь ізолятор. Оскільки параметри часткової дуги і кількість дуг, що одночасно існують на поверхні ізолятора, випадкові, то і перекриття також є випадковою подією, що характеризується певною ймовірністю. Ймовірність перекриття ізолятора підвищується зі збільшенням діючої напруги, оскільки при цьому зростає струм витоку, що сприяє подовженню часткових дуг до повного перекриття ізолятора.

З наведеної картини розвитку розряду випливає, що розрядні напруги ізоляторів будуть тим вищими, чим менший струм витоку [4]:

$$I_B = \frac{U}{R_B}, \quad (3)$$

де I_B – струм витоку по ізолятору;

R_B – опір витоку по поверхні ізолятора.

Якщо шар забруднення має товщину Δ з питомих об'ємним опором ρ , то для циліндричного гладкого ізолятора діаметром D :

$$R_B = \frac{\rho \cdot L_B}{\pi \cdot \Delta \cdot D}, \quad (4)$$

де L_B – довжина струму витоку.

З формул (3) та (4) виходить, що:

$$I_B = \frac{U \cdot \pi \cdot \Delta \cdot D}{\rho \cdot L_B}.$$

Отже, розрядна напруга ізолятора зростатиме зі збільшенням довжини шляху витоку і зменшенням діаметра ізолятора:

$$U_{вол.р} = \frac{I_B \cdot \rho \cdot L_B}{\pi \cdot \Delta \cdot D}.$$

Оскільки процеси підсушування поверхні ізолятора відбуваються відносно повільно, то за короточасних перенапруг вони не встигають розвинути і напруга перекриття буває вищою, ніж за тривалого впливу напруги.

Вологорозрядна напруга ізолятора залежить від характеристик шару забруднення, його кількості та складу, а також від інтенсивності та виду зволоження. Велике розмаїття видів забруднення, що трапляються в умовах експлуатації, не дає змоги вибрати єдине «стандартне» забруднення, яке можна було б наносити на поверхню ізоляторів під час визначення вологорозрядних напруг. Найбільш правильно розрядні напруги в реальних умовах забруднення і

зволоження можуть бути визначені з досвіду експлуатації.

Однак, при теоретичних розрахунках, заради оптимізації конструкції концепту, можна звернутися до наступного методу. Вологорозрядна напруга залежить від довжини шляху струму витoku вздовж поверхні ізолятора між електродами ($L_{\text{вт}}$), а також від конфігурації ізолятора, характеристик дощу, виду напруги.

Вологорозрядна напруга ізоляторів визначається на змінній та імпульсній напругах. При випробуванні ізолятор повинен перебувати в нормальному робочому положенні, струмені дощу повинні падати під кутом 45° до горизонту з інтенсивністю 3 мм/хв, провідність води повинна дорівнювати 10^{-4} См/см. Напруга повинна прикладатися до ізолятора через 5 хв після початку зволоження (рис. 2).

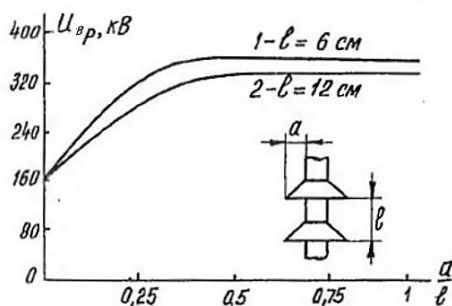


Рисунок 2 – Залежність $U_{\text{вп}}$ ізолятора від a/l

При малому вильоті ребер ($a/l < 0,5$) зі збільшенням мокророзрядна напруга зростає за рахунок збільшення довжини сухих ділянок під ребрами. В цьому випадку розряд практично йде вздовж поверхні ребер.

Збільшення l (при $a = \text{const}$) призводить до зниження $U_{\text{вп}}$ внаслідок зменшення сухих зон під ребрами, тому треба зменшувати.

Досвід показує, що за нормальних умов відношення a/l не повинно перевищувати 0,5.

Під час роботи ізолятора за умов забруднення відношення a/l рекомендується збільшувати до 0,8–1,0.

Кут нахилу ребер беруть близько $15\text{--}25^\circ$ [5].

При $a > 30$ мм вплив кута нахилу на $U_{\text{вп}}$ малий. Ребро повинно мати крапельницю (рис. 3), щоб вода не змочувала нижню поверхню ребра та не скорочувала сухі ділянки поверхні ізолятора. При напрузі промислової частоти та силі дощу 5 мм/хв мінімальне значення вологорозрядної напруги можна визначити за формулою $U_{\text{вп}} = 2,15l_{\text{схр}}$, кВ, де $l_{\text{схр}}$ – в см [6].

Вологорозрядні напруги при постійній і змінній напрузі практично однакові. Атмосферні умови (тиск і температура) мало впливають на $U_{\text{вп}}$.

Не дивлячись на те, що дощ не впливає на підземні лінії електропередач, однак, загальна вологість та конденсат присутні. І тут вже спрацьовує правило, що чим вища провідність води, що є як аерозоль в повітрі та на поверхнях, тим менше $U_{\text{вп}}$.

Дощ та волога практично не впливає на імпульсну розрядну напругу вздовж поверхні діелектрика.

Середня вологорозрядна напруженість при $f = 50$ Гц становить 2,1–2,4 кВ/см [7].

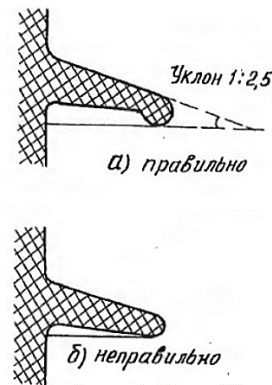


Рисунок 3 – Профіль ребра

Основним розрахунковим параметром при виборі ізоляції для забруднених районів є питома довжина шляху витoku ($l_{\text{вд}}$), яка дорівнює відношенню повної довжини шляху витoku $L_{\text{вт}}$ до найбільшої робочої лінійної напруги $U_{\text{роб.л.}}$.

Альтернативна методика розрахунку. Не дивлячись на вірність наведеної вище методики, описані формули мають в собі параметри, які складно встановити, або неможливо без експерименту, тому вищеописана методика може використовуватися, як засіб перевірки результатів експерименту.

Однак перед експериментом нам необхідно встановити розрахункові дані.

Встановимо ще раз, що перекриття ізоляції відбувається, як правило, при зволоженні моросячим дощем, туманом, росою, коли забруднений шар насичується вологою і на поверхні ізоляторів виникає електроліт. По поверхні ізолятора починає протікати струм, що називається струмом витoku. Електроліт розігрівається, волога випаровується. На окремих ділянках поверхні, де щільність струму найбільша або найменша товщина зволоженого шару, виникають підсушені зони. Ці зони швидко розширюються у напрямку, перпендикулярному лініям струму, до тих пір, поки внаслідок збільшення падіння напруги не відбувається перекриття підсушених зон шириною всього декілька міліметрів по повітря. Виникає електрична дуга, опорні точки якої розміщуються по краям підсушеної зони. Вольт-амперна характеристика дуги відповідає функції виду [8, 9]:

$$E_{\text{д}} = at^n, \quad (5)$$

де a й n – постійні, що залежать від струму та від щільності повітря.

Струм, що протікає по каналу дуги, обмежується опором поверхні ізолятора. Поверхневий опір гладкого стрижневого ізолятора діаметром d з довжиною шляху струму витoku L та товщиною шару забруднення Δ рівний [4]:

$$R_{\text{п}} = \rho_{\text{об}} \frac{L}{\pi \Delta D} = \frac{\rho_{\text{п}} L}{\pi D} = \frac{L}{\pi \gamma_{\text{п}} d} = \frac{L}{\gamma_{\text{п}} B}, \quad (6)$$

де $\pi \Delta D$ – площа перерізу шару забруднення;

$\rho_{об}$ – його питомий об'ємний опір;
 $\rho_{п}$ – питомий поверхневий опір;
 $\gamma_{п}$ – питомо поверхнева провідність;
 B – ширина шляху струму витoku.

Визначення $R_{п}$ через питомий поверхневий опір або провідність більш зручні для використання, оскільки не потребують знання значень, що важко визначити – товщини шару забруднення.

Опір шару забруднення, частково шунтованого дугою:

$$R_{\Sigma} = R_{п} - (r_{п} - r_{д})l_{д}, \quad (7)$$

де $r_{п}$ та $r_{д}$ – опір одиниці довжини поверхні ізолятора та дуги відповідно; $l_{д}$ – довжина дуги.

Згідно формулам (5) та (6):

$$r_{п} = \frac{1}{\pi\gamma_{п}d} = \frac{1}{\gamma_{п}B}; \quad (8)$$

$$r_{д} = \frac{E_{д}}{l} = \alpha l^{-(n+1)}. \quad (9)$$

Якщо в місці виникнення підсушеної кільцевої зони $r_{п} > r_{д}$ [10], де $r_{п}$ (рис. 4) – опір ділянки, що розглядається в зволоженому стані, то після дуги $R_{\Sigma} < R_{п}$ та струм поверхні ізолятора при виникненні дуги зменшується у порівнянні зі струмом по зволоженої поверхні:

$$I = \frac{U}{R_{\Sigma}} = \frac{U}{R_{п} - (r_{п} - r_{д})l_{д}}. \quad (10)$$

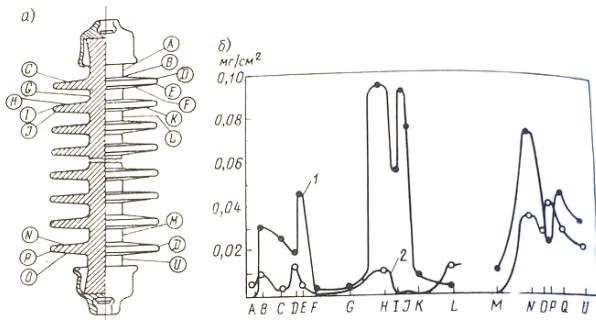


Рисунок 4 – Розподілення поверхневої щільності забруднення по довжині шляху витoku довгострижневого ізолятора (а) та за результатами дослідження в наведених точках (б) 1 – до дощу; 2 – після дощу

Розігріта опорними точками дуги зволожена поверхня швидко підсушується. Тому дуга безперервно переміщується. В результаті підсохла кільцева зона розширюється, що призводить до видовження дуги. Це приводить до подальшого зменшення струму згідно (9) та збільшення $r_{д}$, що також приводить до зменшення струму. В результаті, виділення тепла на поверхні ізолятора знижується. Поверхня знову зволожується. По ній відновлюється струм. Дуга гасне. Такий режим межевих дужок є нормальним для роботи ізоляції в електричних мережах.

Також, якщо $r_{п} < r_{д}$, то $R_{\Sigma} < R_{п}$ й струм після виникнення дуги збільшується. Подовження дуги призводить до подальшого зменшення опору $r_{д}$ та збільшенню струму. Це, в свою чергу, призводить до подальшого зменшення опору $r_{д}$ та подальшому зростанню струму. В результаті опорні точки дуги проковзують по зволоженої поверхні зі швидкістю 50 м/с та більше аж до повного перекриття ізолятора [11–13].

Виходячи з наведеного, умова перекриття ізолятора:

$$r_{д} \leq r_{п}. \quad (11)$$

Котре при підстановці значень $r_{п}$ та $r_{д}$ переписується у вигляді:

$$\alpha l^{-(n+1)} \leq \frac{1}{\pi\gamma_{п}d} = \frac{1}{\gamma_{п}B}. \quad (12)$$

При $r_{п} = r_{д}$ отримуємо граничний струм по поверхні ізолятора:

$$I_{пр} = (\alpha\gamma_{п}\pi d)^{1/(1+n)} = (\alpha\gamma_{п}B)^{1/(1+n)}. \quad (13)$$

При такому й більшому струмі відбувається перекриття ізолятора. Використовуючи це граничне значення струму, отримуємо вологорозрядну напругу:

$$U_{вол.р} = I_{пр}R_{п} = \frac{La^{1/(1+n)}}{(\gamma_{п}\pi d)^{n/(1+n)}} = \frac{La^{1/(1+n)}}{(\gamma_{п}B)^{n/(1+n)}}. \quad (14)$$

Як видно, $U_{вол.р}$ пропорційно довгє шляху витoku, що дозволяє визначити середню вологорозрядну напругеність по довжині шляху витoku:

$$E_{вол.р} L = \frac{U_{вол.р}}{L} = \frac{\alpha^{1/(1+n)}}{(\pi\gamma_{п}d)^{n/(1+n)}} = \frac{\alpha^{1/(1+n)}}{(\gamma_{п}B)^{n/(1+n)}}, \quad (15)$$

яка зменшується при збільшенні діаметру ізолятора та питомої поверхневої провідності (рис. 5).

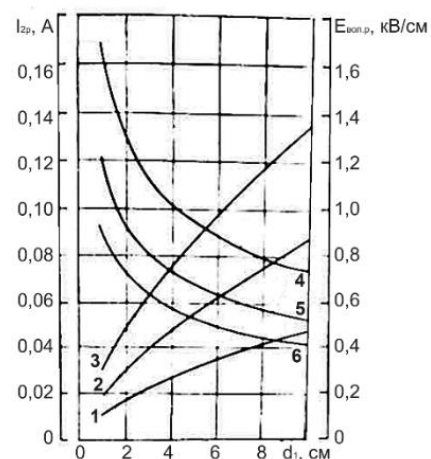


Рисунок 5 – Залежності граничних струмів витоків (криві 1, 2 та 3) та мінімальних розрядних напругеностей поля вздовж шляху струму витoku (криві 4, 5 та 6) циліндричних ізоляторів від діаметру ізолятора при різних провідностях: $\gamma_{п} = 2$ мкСм (криві 1, 4); $\gamma_{п} = 5$ мкСм (криві 2, 5); $\gamma_{п} = 10$ мкСм (криві 3 та 6)

В той же час граничне значення струму витоку зростає при збільшенні діаметра ізолятора. Розрахунки виконані по формулам (14) та (15) при $a = 1,4 \cdot 10^4 \text{ В} \cdot \text{А}^n / \text{м}$, $n = 0,56$ [14].

Виходячи з цього, при малих γ_{Π} розрядні напруженості при $d < 4 \text{ см}$ достатньо високі. Однак при збільшенні діаметру ізолятора та ступені його забруднення $E_{\text{вол.р } L}$ зменшується настільки, що створити прийнятну ізоляційну конструкцію для апаратів зовнішньої установки неможливо. Для підвищення розрядних напруг використовуються ребра (рис. 6), роль яких зводиться до збільшення опору на одиницю будівної висоти ізолятора. При однакових γ_{Π} для стрижня і ребра опору зволоженої поверхні одного ребра (двох його сторін та зовнішнього краю):

$$R_{\Pi} = \frac{2}{\pi \gamma_{\Pi}} \int_0^{0,5(d_2-d_1)} \frac{dl}{d(l)} + \frac{c}{\pi \gamma_{\Pi} d_2}, \quad (16)$$

де l – поточна координата вздовж шляху витоку, що відраховується від місця суміщення ребра зі стрижнем.

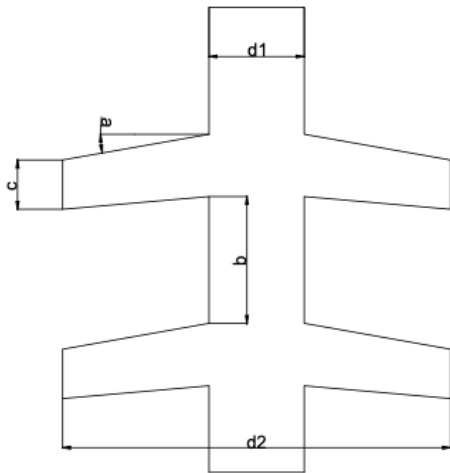


Рисунок 6 – Модель стрижневого ізолятора

Оскільки $d(l) = d_1 + 2l \cos \alpha$, $dd(l) = 2 \cos \alpha dl$ (рис. 6), то, переходячи до змінної d та змінюючи відповідно межі інтегрування, отримуємо $d(l) = d_1$ при $l = 0$, $d(l) = d_2$ при $l = 0,5 (d_2 - d_1)$:

$$R_{\Pi} = \frac{1}{\pi \gamma_{\Pi} \cos \alpha} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{c}{\pi \gamma_{\Pi} d_2}. \quad (17)$$

Згідно формули (13) та рис. 6 граничний струм витоку визначається діаметром тіла ізолятора d_1 , оскільки при цьому діаметрі розвиток дуги може відбуватися при найменшому струмі. Для того, щоб дуга могла подовжитися на краю ребра ($d = d_2$), необхідний значно більший струм. Після перекриття межреберні відстані ізолятора по стрижню опорної точки дуги вільно проковзують по поверхні сусідніх ребер аж до їх країв, оскільки це переміщення призводить до зменшення опору в ланцюгу та відповідно до росту струму та подальшому зменшенню опору дуги (при незмінній її довжині). Тому вологорозрядна напруга у випадку ребристого ізолятора дорівнює [15–18]:

$$U_{\text{вол.р}} = I_{\text{пр}} R_{\Pi} = (\alpha \pi \gamma_{\Pi} d_1)^{1/(1+n)} \times \\ \times \left(\frac{bm}{\alpha \pi \gamma_{\Pi} d_1} + \frac{cm}{\alpha \pi \gamma_{\Pi} d_2} + \frac{m}{\alpha \pi \gamma_{\Pi} \cos \alpha} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) = \\ = \frac{\alpha^{1/(1+n)} mb}{(\pi \gamma_{\Pi} d_1)^{n/(1+n)}} \left(1 + \frac{c}{b} \cdot \frac{d_1}{d_2} + \frac{d_1}{b \cos \alpha} \ln \frac{d_2}{d_1} \right),$$

де m – число ребер ізолятора.

Інструмент розрахунку вологорозрядної напруги. Маючи приблизні результати з методики один та формули з альтернативної методики, де для розрахунку використовуються загальновідомі данні, стає можливим створення інструменту для автоматичного розрахунку вологорозрядної напруги та напруженості для ізоляторів.

За формулами з альтернативної методики було розроблено таблицю для розрахунку вологорозрядної напруги (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати розрахунку в програмі розрахунку вологорозрядних характеристик

Характеристики	
Діаметр стрижня ізолятора d_1 , мм	25
Діаметр шапки ізолятора d_2 , мм	65
Висота проміжку між шапками ізолятора b , мм	20
Висота шапки c , мм	3
Кут нахилу шапки ізолятора α	12°
Довжина струму витоку ізолятора L , мм	2610
Висота ізолятора H , мм	1055
Провідність шару забруднення γ_{Π} , мкСм	10
Кількість шапок по довжині стрижня ізолятора m , шт.	29
Тип ізолятора	Ребристий
Розрахункові значення	
Вологорозрядна напруга $U_{\text{вол.р}}$, кВ	549,08
Вологорозрядна напруженість по довжині шляху витоку $E_{\text{вол.р } L}$, кВ/см	2,10

У табл. 1 тип ізолятора залежно від діаметру шапок може бути або ребристим (при однаковому діаметрі шапок по всій довжині ізолятора), або складним (коли шапки різного діаметру).

Основою для розрахунків та вихідними даними є база даних ізоляторів, яка представляє собою таблицю характеристик ізолятора (табл. 2). Вносячи в неї нові ізолятори, можна отримати вологорозрядні характеристики. Технічні характеристики наводяться в технічній документації для відповідного ізолятора.

Розрахунок відбувається на окремому листі розрахунків. В ньому представлено розрахунки для складної та простої форми ізоляторів, за формулами, наведеними вище.

Також було імплементовано ряд допоміжних функцій, таких як розрахунок граничного струму витоку, вологорозрядної напруженості та інші.

За результатами розрахунків було встановлено, що при провідності шару забруднення 10 мкСм для полімерного ізолятора ЛК 70-110, вологорозрядна напруга склала 549 кВ, що відповідає вологорозрядній напрузі в 2,1 кВ/см довжини шляху струму витоку.

Таблиця 2 – База даних ізоляторів

Назва	ЛК 70/10-И-3 СП(СС)	ЛК 70/20-ИУ-2 СП(СС)	ЛК 70/35-И(ИУ)-2 СП(СС)	ЛК 70/110-И-2 СП(СС)
Визначення	0	0	0	1
Діаметр стрижня ізолятора d_1 , мм	25			
Діаметр шапки ізолятора d_2 , мм	65			
Висота проміжку між шапками ізолятора b , мм	20			
Висота шапки c , мм	3			
Кут нахилу шапки ізолятора α	12			
Довжина струму витoku ізолятора L , мм	360	565	895	2610
Висота ізолятора H , мм	185	235	385	1055
Провідність шару забруднення γ_n , мкСм	10			
Кількість шапок по довжині стрижня ізолятора m , шт.	4	9	11	29
Тип ізолятора	Рєбристий			
Параметр для окремого діаметру при складній формі ізолятора d_2' , мм	65			
Параметр для другого окремого діаметру при складній формі ізолятора d_3' , мм	0			
Еквівалентний діаметр, розрахунковий параметр для складної форми d_e , мм	65			

Висновки. Результати розрахунку повністю відповідають результатам середньому визначеному значенню вологорозрядної напруги, що відповідає значенню від 2,1 до 2,5 кВ/см, що підтверджує те, що альтернативна методика дає дійсні значення при розрахунку.

Отже, можна стверджувати, що даний інструмент добре підходить для розрахунків вологорозрядних характеристик і його результати можуть бути використані для порівняння з експериментальними значеннями.

Слід зазначити, що дана методика, в першу чергу розроблялась для пошуку вологорозрядних характеристик ізоляторів із зовнішнім розташуванням, що однак не робить її непридатною для використання для розрахунків ізоляторів в умовах підземної підстанції.

Головною відмінністю буде відносна сталість вологості забруднень на ізоляторах та характер забруднень, який матиме не хаотичне зростання, як при зовнішньому розташуванні обладнання, а скоріш за все лінійне.

Дані питання потребують детального розгляду, чому й будуть присвячені наші наступні роботи.

Список літератури

- Shevchenko S. Y., Ganus R. O. Discharge voltage under humid conditions. *Енергетика. Електроніка. Електромеханіка*. 2023. No. 4(182). P. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2023.04.02>.
- Forrest J. S. The characteristics and performance in service of high-voltage porcelain insulators. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part II: Power Engineering*. 1942. Vol. 89, no. 7. P. 60–80. DOI: <https://doi.org/10.1049/ji-2.1942.0008>.
- IEEE Std C37.122.5-2013. IEEE Guide for Moisture Measurement and Control in SF6 Gas-Insulated Equipment. Replaces IEEE Std 1125-1993; effective from 2013-12-20. Official edition. 42 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6692861>.
- König D. Problem der Isoliergasfeuchte in metalgekapselten Hochspannungs-Schaltanlagen. *ETZA*. 1973. Vol. 94, no. 7. P. 384–390.
- Kreuger F. H. Industrial High Voltage: Fields/Dielectrics/Constructions. Delft University Press, 1991. 184 p.
- Factors controlling surface flashover in SF6 gas insulated systems / T. Nitta et al. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1978. PAS-97, no. 3. P. 959–968. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpas.1978.354569>.
- Use of leakage currents of insulators to determine the stage characteristics of the flashover process and contamination level prediction / J. Li et al. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010. Vol. 17, no. 2. P. 490–501. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2010.5448105>.
- Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskyi S. Experimental research of the electrical strength of the insulated system “protected wire-line insulator”. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. P. 83–87. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263212>.
- Faramarzi Palangar M., Mirzaie M., Mahmoudi A. Improved flashover mathematical model of polluted insulators: a dynamic analysis of the electric arc parameters. *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 179. 106083. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106083>.
- Investigation of the leakage current of the suspend dish insulator of type PSD-70E in various conditions / I. Borzenkov et al. *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>.
- Gençoğlu M. T., Cebeci M. The pollution flashover on high voltage insulators. *Electric Power Systems Research*. 2008. Vol. 78, no. 11. P. 1914–1921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.03.019>.
- 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>.
- Effect of moisture on temperature rise of composite insulators operating in power system / Y. Tu et al. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015. Vol. 22, no. 4. P. 2207–2213. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2015.004696>.
- Моделювання електричного поля прохідного полімерного ізолятора для визначення точок концентрації поля / С. Ю. Шевченко та ін. *Електротехніка та електроенергетика*. 2022. № 2. С. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2022-2-5>.
- Study on the wetting process and its influencing factors of pollution deposited on different insulators based on leakage current / Z. Zhang et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013. Vol. 28, no. 2. P. 678–685. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2012.2226758>.

16. Пошук оптимального засобу моделювання електричного поля ізоляторів / С. Ю. Шевченко та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2021. № 2 (3). С. 137–143. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.17>.
17. Polymeric insulator conditions estimation by using leakage current characteristics based on simulation and experimental investigation / A. A. Salem et al. *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 4. P. 737. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14040737>.
18. Contamination level prediction of insulators based on the characteristics of leakage current / Jingyan Li et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010. Vol. 25, no. 1. P. 417–424. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2009.2035426>.
- analysis of the electric arc parameters”, *Electric Power Systems Research*, vol. 179, Feb. 2020, Art. no. 106083, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2019.106083>
10. 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. IEEE, pp. 98–101, doi: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263113>
11. M. T. Gençoğlu and M. Cebeci, “The pollution flashover on high voltage insulators”, *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 11, pp. 1914–1921, Nov. 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2008.03.019>
12. 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>
13. Y. Tu et al., “Effect of moisture on temperature rise of composite insulators operating in power system”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 4, pp. 2207–2213, Aug. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2015.004696>
14. S. Yu. Shevchenko, D. O. Danylchenko, Yu. A. Viazovychenko, A. E. Potryvai, and V. M. Tsiupa, “Simulation of the electric field of a polymeric insulator bushing to determine the field concentration points”, *Electrical Engineering and Power Engineering*, no. 2, pp. 49–57, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2022-2-5> (in Ukrainian)
15. Z. Zhang, X. Jiang, H. Huang, C. Sun, J. Hu, and D. W. Gao, “Study on the wetting process and its influencing factors of pollution deposited on different insulators based on leakage current”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 678–685, Apr. 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2012.2226758>
16. S. Y. Shevchenko, D. Danylchenko, A. Potryvai, S. Dryvetskyi, and S. Bilyk, “Search for the optimal means for modelling the electric field of insulators”, *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 2 (3), pp. 137–143, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.17> (in Ukrainian)
17. A. A. Salem et al., “Polymeric insulator conditions estimation by using leakage current characteristics based on simulation and experimental investigation”, *Polymers*, vol. 14, no. 4, p. 737, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14040737>
18. Jingyan Li, Caixin Sun, Wenxia Sima, Qing Yang, and Jianlin Hu, “Contamination level prediction of insulators based on the characteristics of leakage current”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, pp. 417–424, Jan. 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2009.2035426>

Надійшла (received) 17.06.2024

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Шевченко Сергій Юрійович (Sergii 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.

Данильченко Дмитро Олексійович (Dmytro Danylchenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: Dmytro.Danylchenko@khpri.edu.ua.

Ганус Роман Олексійович (Roman Ganus) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2442-6087>; e-mail: mrgans.roma@gmail.com.

Варв'янська Вікторія Віталіївна (Viktoriia Varvianska) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри промислової та біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4962-6245>; e-mail: tvita62@gmail.com.