

ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ПІДСТАНЦІЙ 330(220) кВ

О.Ю. Глебов^{*}, канд. техн. наук, **Д.Г. Коліушко**^{**}, канд. техн. наук, **А.В. Плічко**^{***},
С.С. Руденко^{****}, канд. техн. наук

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.

E-mail: nio5_molniya@ukr.net.

В електроенергетиці України основними системоутворюючими об'єктами є лінії електропередачі та підстанції з розподільними пристроями 330(220) кВ. Найбільш потужними джерелами небезпеки на підстанціях є короткі замикання на шинах, прямий удар блискавки або спрацювання обмежувачів перенапруги і розрядників. Метою статті є вдосконалення способу визначення опору заземлювального пристрою підстанцій з відкритими розподільними пристроями 330(220) кВ, спрямованого на підвищення точності з урахуванням найбільш впливових незалежних факторів. Для проведення досліджень використовувалися положення теорії планування експериментів, теорія електричних кіл, математичне моделювання в пакеті Grounding 1.0, LiGro та Microsoft Excel. У роботі наведено результати багатофакторних експериментів задля визначення залежності опору заземлювального пристрою з рівномірною сіткою від його площі, розміру чарунки сітки, периметра поперечного перерізу заземлювачів, еквівалентного питомого опору ґрунту, струму короткого замикання та глибини залягання сітки. У роботі отримала подальший розвиток методика визначення параметрів заземлювальних пристроїв підстанцій 330(220) кВ, спрямована на забезпечення нормованих значень опору заземлювального пристрою та напруги на заземлювальному пристрої з використанням формул, отриманих за результатами багатофакторних експериментів. Отримані в роботі результати надають змогу забезпечити зменшення ймовірності пошкодження ізоляції кабелів 6-10 кВ, а також кабелів вторинних кіл від низькочастотних та високочастотних (імпульсних) напруг у разі стікання в заземлювальний пристрій великих струмів в режимі однофазного замикання на землю в електричних мережах з заземленою нейтраллю. Бібл. 9, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: підстанція, заземлювальний пристрій, опір заземлювального пристрою, напруга на заземлювальному пристрої, повний факторний експеримент.

Вступ. Головною задачею заземлювального пристрою (ЗП) електроустановок є забезпечення електробезпеки [1]. Задля вирішення цієї задачі розроблено основні критерії проектування ЗП: за допустимим значенням опору ЗП; за допустимим значенням напруги дотику.

В електроенергетиці України основними системоутворюючими об'єктами є лінії електропередачі та підстанції з розподільними пристроями 330(220) кВ. Ці об'єкти відносяться до електричних мереж із заземленою нейтраллю, мають великі струми замикання на землю і становлять найбільшу небезпеку для персоналу та електрообладнання в аварійних режимах. Найбільш потужними джерелами небезпеки є короткі замикання (КЗ) на шинах, прямий удар блискавки або спрацювання обмежувачів перенапруги і розрядників. Загальною особливістю зазначених процесів є втікання великих струмів у ЗП, хоча амплітудно-часові параметри суттєво відрізняються. Саме в цих режимах найважливішу роль для забезпечення електробезпеки має конструктивне виконання ЗП.

У [2] розглянуто близько 40 параметрів, що впливають на опір ЗП підстанцій з відкритими розподільними пристроями (ВРП) 330(220) кВ, багато з яких є взаємопов'язаними. Аналіз експериментальних даних, отриманих під час проведення діагностики ЗП вісімдесяти підстанцій 330(220) кВ, надав змогу виділити шість незалежних факторів та визначити реальний діапазон їхніх значень:

- 1) площа ЗП $S = [0,906; 9,251] \times 10^4 \text{ м}^2$;
- 2) розмір чарунки сітки $b = [7,03; 30,4] \text{ м}$;
- 3) периметр перерізу заземлювачів $p = [31,4; 172,0] \text{ мм}$;
- 4) еквівалентний питомий опір ґрунту $\rho = [1,69; 249,67] \text{ Ом} \times \text{м}$;
- 5) струм однофазного КЗ на шинах ВРП $I = [2,43; 42,961] \text{ кА}$;
- 6) глибина залягання заземлювачів $t = [0,5; 2,0] \text{ м}$.

Струм КЗ та опір ЗП визначають ще одну нормовану величину, а саме напругу на ЗП, яка в аварійних режимах становить небезпеку для ізоляції кабелів, що виходять за межі ЗП. Зменшення на-

© Глебов О.Ю., Коліушко Д.Г., Плічко А.В., Руденко С.С., 2023

ORCID: *<https://orcid.org/0000-0003-0215-177X>; ** <https://orcid.org/0000-0003-3112-4260>;

*** <https://orcid.org/0009-0003-1733-7726>; **** <https://orcid.org/0000-0002-2544-1545>

пруги на ЗП у разі КЗ та ударах блискавки, дає змогу знизити ймовірність пошкодження ізоляції кабелів 6–10 кВ, а також кабелів вторинних кіл як низькочастотними, так і високочастотними (імпульсними) напругами під час втікання в ЗП великих струмів. У зв'язку з цим підвищення точності визначення опору ЗП з урахуванням вказаних вище параметрів є актуальною задачею.

Існує низка відомих способів визначення опору ЗП.

Формула Карякіна. Опір ЗП визначається за формулою [3], Ом

$$R = 0,5\rho S^{-1/2}, \quad (1)$$

де S – площа ЗП, м²; ρ – еквівалентний питомий опір ґрунту, Ом×м.

Формула Двайта. Опір ЗП квадратної рівномірної сітки, розташованої в однорідному ґрунті, визначається за формулою [4], Ом

$$R = \rho/2D, \quad (2)$$

де D – діаметр кола, площа якого дорівнює площі ЗП, м.

Формула Лорана та Неймана. Опір ЗП квадратної рівномірної сітки, розташованої у двошаровому ґрунті, визначається за формулою [4], Ом

$$R = \frac{\rho_2}{2D} + \frac{\rho_1}{\ell_1}, \quad (3)$$

де ρ_1 та ρ_2 – питомий опір шарів ґрунту, Ом×м; ℓ_1 – загальна довжина горизонтальних заземлювачів, м.

Оскільки товщина шарів ґрунту не вказана, тому цю формулу можна використовувати для ЗП в однорідному ґрунті, Ом

$$R = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{\ell_1}, \quad (4)$$

де ℓ_1 – загальна довжина горизонтальних заземлювачів, м.

Формула Сверака. Опір ЗП квадратної рівномірної сітки, розташованої в однорідному ґрунті, визначається за формулою [4], Ом

$$R = \frac{\rho}{\ell_1} + \frac{\rho}{\sqrt{20 \cdot S}} \left(1 + \frac{1}{1 + t\sqrt{20/S}} \right), \quad (5)$$

де t – глибина залягання заземлювачів, м.

Формула Оллендорфа-Лорана. Опір ЗП квадратної рівномірної сітки, розташованої в однорідному ґрунті, по периметру якої рівномірно встановлені вертикальні заземлювачі, визначається за формулою [4], Ом

$$R = A \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{\ell_1 + \ell_2}, \quad (6)$$

де ℓ_2 – загальна довжина вертикальних заземлювачів, м; A – коефіцієнт пропорційності, який визначається з умов

$$A = 0,444 - 0,84 \frac{\ell + t}{\sqrt{S}} \quad \text{за } 0 \leq \frac{\ell + t}{\sqrt{S}} \leq 0,1, \quad (7)$$

$$A = 0,385 - 0,25 \frac{\ell + t}{\sqrt{S}} \quad \text{за } 0,1 \leq \frac{\ell + t}{\sqrt{S}} \leq 0,5, \quad (8)$$

де ℓ – довжина вертикального заземлювача, м; t – глибина залягання горизонтальних заземлювачів, м.

За відсутності вертикальних заземлювачів в реальному діапазоні значень площі ЗП (від 1×10^4 м² до 9×10^4 м²) та глибини залягання (від 0,4 м до 1,4 м) для згаданих вище підстанцій 330(220) кВ коефіцієнт A буде визначатися умовою (7), тоді формула (6) набуде вигляду, Ом

$$R = \left(0,444 - 0,84 \frac{t}{\sqrt{S}} \right) \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{\ell_1}. \quad (9)$$

Формула Шварца. Опір ЗП прямокутної рівномірної сітки, розташованої в однорідному ґрунті, визначається за формулою [4], Ом

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot \ell_1} \left(\ln \left(\frac{2\ell_1}{\sqrt{d \cdot t}} \right) + k_1 \frac{\ell_1}{\sqrt{S}} - k_2 \right), \quad (10)$$

$$k_1 = 1,84 \frac{\sqrt{a \cdot b}}{2} \left[\frac{1}{a} \cdot \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} \right) + \frac{1}{b} \cdot \ln \left(\frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} \right) + \frac{a}{3b^2} + \frac{b}{3a^2} - \frac{a^2 + b^2}{3a^2 b^2} \sqrt{a^2 + b^2} \right]; \quad (11)$$

$$k_2 = \ln \left(\frac{4(a+b)}{b} \right) + 2k_1 \frac{a+b}{\sqrt{a \cdot b}} - \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 + (b/2)^2}}{b/2} \right) - \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{b/2 + \sqrt{a^2 + (b/2)^2}}{\sqrt{a^2 + (b/2)^2} - b/2} \right), \quad (12)$$

де d – діаметр горизонтальних заземлювачів, м; a – менша сторона прямокутної сітки, м; b – більша сторона прямокутної сітки, м.

Для квадратної сітки, в якій $a = b$, коефіцієнти k_1 та k_2 мають значення $k_1 = 1,368$; $k_2 = 5,625$, підставив які в (10), отримаємо, Ом

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot \ell_1} \left(\ln \left(\frac{2\ell_1}{\sqrt{d \cdot t}} \right) + 1,368 \frac{\ell_1}{\sqrt{S}} - 5,625 \right). \quad (13)$$

Для прямокутної сітки, у якій, наприклад, $b = 3 \cdot a$, коефіцієнти k_1 та k_2 мають значення $k_1 = 1,274$; $k_2 = 5,738$, підставив які в (10), отримаємо, Ом

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot \ell_1} \left(\ln \left(\frac{2\ell_1}{\sqrt{d \cdot t}} \right) + 1,274 \frac{\ell_1}{\sqrt{S}} - 5,738 \right). \quad (14)$$

Проведений в [5, 6] аналіз показує, що вирази (2) – (14) по теперішній час залишаються практично безальтернативними способами інженерного визначення опору ЗП, виконаних у вигляді рівномірної сітки. Порівняння розрахункових даних за вказаними формулами з результатами моделювання показало похибку, що досягає декількох десятків відсотків. Таким чином, отримання уточнених виразів задля визначення опору ЗП є актуальною задачею.

Метою роботи є вдосконалення способу визначення опору ЗП підстанцій з відкритими розподільними пристроями 330(220) кВ, спрямованого на підвищення точності шляхом урахування найбільш впливових незалежних факторів. Задля досягнення цієї мети слід отримати математичні вирази залежності опору ЗП від його площі, розміру чарунки сітки, периметра поперечного перерізу заземлювачів, еквівалентного питомого опору ґрунту, струму короткого замикання та глибини залягання сітки. Для цього слід провести повний дворівневий багатофакторний експеримент (ПФЕ).

Матеріали дослідження. У табл. 1 наведено максимальні та мінімальні значення коефіцієнтів пропорційності між формулою (1) та іншими формулами визначення опору ЗП для підстанцій 330 (220) кВ в реальному діапазоні значень параметрів ЗП: площа ЗП $S = [1 \div 9] \cdot 10^4 \text{ м}^2$; розмір чарунки сітки $b = [5; 25]$ м або пов'язана з ним загальна довжина горизонтальних заземлювачів ℓ_1 , м; периметр перерізу горизонтальних заземлювачів $p = [32; 152]$ мм, або пов'язаний з ним діаметр горизонтальних заземлювачів; глибина їх залягання $t = [0,4; 1,4]$ м.

Таблиця 1

Формула опору ЗП	Коефіцієнт пропорційності	
	макс.	мін.
(1)	1,0	
(2)	0,8862	
(4)	1,0862	0,9026
(5)	1,0867	0,9017
(9)	1,0813	0,8966
(13) за $b = a$	1,1716	0,9068
(14) за $b = 3 \cdot a$	1,1047	0,8465

Загальну довжину горизонтальних заземлювачів можна визначити за формулою, м

$$\ell_1 = \frac{2\sqrt{S}(\sqrt{S} + b)}{b}, \quad (15)$$

де b – розмір квадратної чарунки рівномірної сітки ЗП, м.

Аналіз зазначених коефіцієнтів показує, що максимальні значення опору ЗП за формулами (4), (5) та (9) перевищують опір ЗП за формулою (1) не більше, ніж на 9%. Максимальні значення опору ЗП за формулами (13)

та (14) більше опору ЗП за формулою (1) на 17,16% та 10,47% відповідно. Мінімальні значення опору ЗП за формулами (4), (5), (9) та (13) менше опору ЗП за формулою (1) практично не більше, ніж на 10%. Мінімальні значення опору ЗП за формулами (2) та (14) менше опору ЗП за формулою (1) на 11,38% та 15,35% відповідно. Таким чином, в інженерній практиці для первинної приблизної оцінки опору ЗП доцільно використовувати формулу (1).

Аналіз залежності опору ЗП від глибини залягання заземлювачів показав, що для ЗП з параметрами $S = 5 \times 10^4 \text{ м}^2$, $b = 15$ м, $p = 92$ мм у разі збільшення глибини в 3,5 рази (з 0,4 м до 1,4 м) опір змінився менше, ніж на 2%.

Аналіз відомих формул визначення опору ЗП показав, що формули (1) Карякіна та (2) Двайта є

найпростішими, але враховують лише два фактори з шести незалежних, наведених вище: площу ЗП (S) або пов'язаний з нею діаметр кола (D) та еквівалентний питомий опір ґрунту (ρ). Причому, за формулою (2) значення опору ЗП є найменшим з усіх розглянутих для квадратної сітки. Тобто, визначення опору ЗП за формулою (2) позбавляє ЗП будь якого запасу на випадок погіршення параметрів ЗП протягом експлуатації. Тому цю формулу не доцільно використовувати навіть для приблизної оцінки опору ЗП.

Формула (3) Лорана та Неймана розроблена для ЗП в двошаровому ґрунті, але товщина шарів ґрунту не враховується, тому доводиться використовувати цю формулу у вигляді формули (4) для ЗП в однорідному ґрунті, яка враховує три фактори: діаметр кола (D), питомий опір ґрунту (ρ) та загальну довжину горизонтальних заземлювачів (ℓ_1) або пов'язаний з нею розмір чарунки сітки (b).

Формула (5) Сверака враховує чотири фактори: площу ЗП (S), питомий опір ґрунту (ρ), загальну довжину горизонтальних заземлювачів (ℓ_1) та глибину залягання заземлювачів (t).

Формула (9) Олендорфа-Лорана також враховує чотири фактори: площу ЗП (S), питомий опір ґрунту (ρ), глибину залягання заземлювачів (t), загальну довжину горизонтальних заземлювачів (ℓ_1) та на додаток ще й загальну довжину вертикальних заземлювачів.

Формула (10) Шварца, розроблена для прямокутної сітки в однорідному ґрунті та для квадратної сітки, набуває вид формули (13), яка враховує вже п'ять факторів: площу ЗП (S), питомий опір ґрунту (ρ), загальну довжину горизонтальних заземлювачів (ℓ_1), глибину залягання заземлювачів (t) та діаметр горизонтальних заземлювачів (d).

Жодна з вказаних вище формул не враховує залежність опору ЗП від струму однофазного КЗ на шинах ВРП (I), що важливо у разі виконання ЗП зі сталевих провідників (характерно майже для всіх підстанцій України) через нелінійність функції магнітної проникності ферромагнетиків від напруженості магнітного поля $\mu = f(H)$ [7].

Тому, для підвищення точності розрахунку опору ЗП необхідно отримати вирази, які враховують всі шість вказаних вище незалежних факторів.

У роботі [2] сформульовано основні положення методики визначення параметрів ЗП підстанцій з ВРП 330(220) кВ, в основі якої лежить залежність $R = f(S; b; p; \rho; I)$, яку отримано за результатами багатофакторного експерименту.

Проведенню багатофакторного експерименту передують проведення однофакторних. Для цього в роботі [2] були складені математичні моделі ЗП, які є квадратними рівномірними сітками, виготовленими зі сталевих прокатів та розташованими горизонтально на глибині, незмінній протягом експерименту. Експерименти проводилися з використанням програмного комплексу LiGro [8]. В ньому можна врахувати: реальну конфігурацію ЗП; тришарову електричну структуру ґрунту; змінну по довжині заземлювача щільність струму, що стікає в ґрунт; нелінійну залежність поздовжнього опору сталевих заземлювачів від амплітуди і частоти струму, що ними протікає. Верифікацію програмного комплексу LiGro зроблено в [8] на основі порівняння з натурними вимірюваннями опору ЗП 70 діючих підстанцій обленерго України.

Аналіз результатів однофакторних експериментів показав [2], що найбільший вплив на опір ЗП має питомий опір ґрунту (ρ), далі в порядку спадання впливу – площа ЗП (S), периметр перерізу заземлювачів (p), розмір чарунки сітки (b), струм КЗ (I) та глибина залягання сітки ЗП (t). Залежності опору ЗП від площі ЗП, периметру перерізу заземлювачів та струму КЗ мають нелінійний характер та апроксимуються поліномами 4-ого, 3-ого та 4-ого ступенів відповідно, а залежності від розміру чарунки, питомого опору ґрунту та глибини залягання мають лінійний (близький до лінійного) характер та апроксимуються рівняннями прямої. Апроксимація графіків та визначення її достовірності виконувалися в програмі Microsoft Excel за методом найменших квадратів. Зауважено [2], що під час проведення багатофакторних експериментів область значень площі ЗП, периметру перерізу заземлювачів та струму КЗ доцільно розділити на ділянки. Крім того показано, що для розглянутих підстанцій опір ЗП залежить від струму КЗ лише у разі $I \leq 10$ кА, та оскільки опір ЗП практично не залежить (менше ніж на 2%) від глибини залягання в діапазоні від 0,4 м до 1,4 м, то під час проведення багатофакторних експериментів глибину можна прийняти незмінною на рівні значення, що допускається [1] $t = 0,7$ м.

У роботі [2] наведено результати ПФЕ з визначення залежності $R = f(S; b; p; \rho; I)$. Границі областей значень факторів були прийняті цілими числами для зручності організації проведення ПФЕ. В зазначеному експерименті область значень площі ЗП було розділено на три ділянки: $S_1 = [1; 3] \times 10^4$ м², $S_2 = [3; 5] \times 10^4$ м², $S_3 = [5; 9] \times 10^4$ м²; область значень струму КЗ – на дві:

$I_1 = [1; 10]$ кА, $I_2 = [10; 40]$ кА. Область значень розміру чарунки сітки $b = [5; 25]$ м та питомого опору ґрунту $\rho = [21; 251]$ Ом×м не були розділені на ділянки. Область значень периметру перерізу заземлювачів $p = [32; 152]$ мм також не була розділена на ділянки, хоча і є суттєво нелінійною, що збільшує похибку отримуваної лінійної моделі.

У даній роботі буде наведено результати ПФЕ з визначення аналогічної залежності $R = f(S; b; p; \rho; L)$, в якому області значень площі ЗП та струму КЗ, як і в зазначеному вище експерименті, розділені на такі ж самі ділянки, але область значень периметру перерізу заземлювачів, на відміну від зазначеного вище, розділена на дві ділянки: $p_1 = [32; 92]$ мм, $p_2 = [92; 152]$ мм, що зменшує похибку лінійної моделі, але вдвічі збільшує трудомісткість експерименту.

Оцінимо похибку визначення опору ЗП за лінійними моделями $R = f(p)$ для ЗП з параметрами, які лежать в середині розглянутих діапазонів: $S = 5 \times 10^4$ м², $b = 15$ м, $\rho = 80$ Ом×м, $I = 21$ кА. Для цього як базову модель приймемо поліном третього ступеню, яким було апроксимовано вказана залежність під час проведення однофакторних експериментів [2]. На рис. 1 наведено графіки $R = f(p)$ для вказаного ЗП.

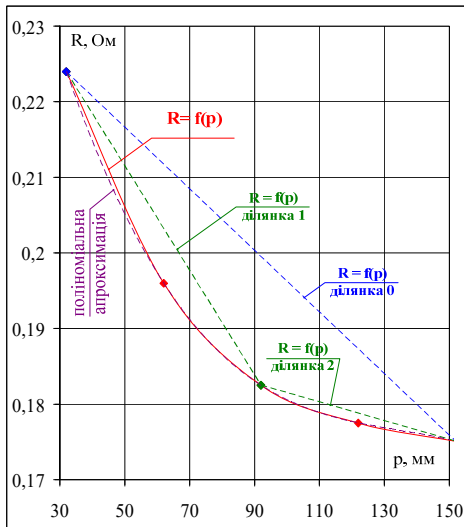


Рис. 1

– ділянка 2 розділеної області значень фактору (рис. 1 " $R = f(p)$ ділянка 2"), Ом

$$R_1 = -1,2333 \cdot 10^{-4} \cdot p + 0,19385, \quad (20)$$

де p – периметр перерізу заземлювача, мм.

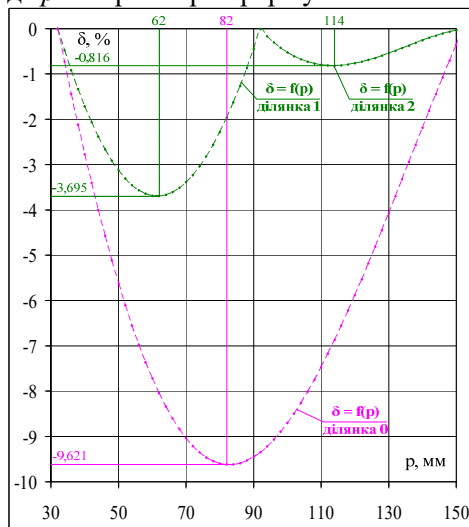


Рис. 2

Похибка визначається за формулою, %

$$\delta = \frac{R_0 - R_1}{R_0} \cdot 100\%, \quad (16)$$

де δ – похибка визначення опору ЗП за лінійними моделями, %; R_1 – опір ЗП, визначений за лінійними моделями, Ом; R_0 – опір ЗП, визначений за базовою моделлю (рис. 1 "поліноміальна апроксимація"), Ом

$$R_0 = -3,6728 \cdot 10^{-8} \cdot p^3 + 1,4875 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 - 2,0797 \cdot 10^{-3} \cdot p + 0,27652, \quad (17)$$

де p – периметр перерізу заземлювача, мм.

Опір ЗП за лінійними моделями (R_1) визначається за формулами, Ом:

– область значень фактору не розділена на ділянки

(рис. 1 " $R = f(p)$ ділянка 0"), Ом

$$R_1 = -4,0750 \cdot 10^{-4} \cdot p + 0,23704; \quad (18)$$

– ділянка 1 розділеної області значень фактору (рис. 1

" $R = f(p)$ ділянка 1"), Ом

$$R_1 = -6,9167 \cdot 10^{-4} \cdot p + 0,24613; \quad (19)$$

На рис. 2 наведено графіки залежності похибки визначення опору ЗП від периметру перерізу заземлювачів $\delta = f(p)$ для розглянутих лінійних моделей $R = f(p)$. Залежності $\delta = f(p)$ є суттєво нелінійними та мають точку екстремуму.

Коли область значень периметру перерізу заземлювачів не розділена на ділянки, максимальною є похибка $\delta = 9,62\%$ за $p = 82$ мм (рис. 2 " $\delta = f(p)$ ділянка 0"). Досить велике значення похибка має й для найбільш поширеного сталю прокату, який використовують для горизонтальних заземлювачів, а саме для прямокутної штаби 4×40 мм та 5×40 мм, у яких периметр перерізу становить 88 мм та 90 мм відповідно, а похибка відповідно має значення 9,53% та 9,45%.

У випадку розділення області значень периметру перерізу заземлювачів на дві ділянки максимальна похибка становить $\delta = 3,69\%$ за $p = 62$ мм (див. рис. 2 " $\delta = f(p)$ ділянка 1"), а для згаданого сталю прокату похибка не перевищує 1%.

За результатами аналізу однофакторних експериментів

проводиться багатофакторний. У випадку розділення області значень площі ЗП на три ділянки, а струму КЗ та периметру перерізу заземлювачів – на дві, кількість гілок експерименту становить 12. Кожна гілка має свої індивідуальні умови (межі) застосування, тобто набір мінімальних ($X_{i,\min}$) та максимальних ($X_{i,\max}$) значень всіх факторів. Вказаний набір відповідає прийнятому в експерименті розділенню на ділянки областей значень кожного i -того фактору.

Згідно з теорією планування експерименту [9] було проведено регресійний та дисперсійний аналіз значень опору ЗП, розрахованих з використанням програмного комплексу LiGro. В результаті були отримані рівняння регресії для заданих умов (меж) застосування та формули визначення кодованих значень усіх факторів для кожної гілки за формулою

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{h_i}, \quad (21)$$

де X_i – поточне значення i -того фактору на ділянці області значень від $X_{i,\min}$ до $X_{i,\max}$, яка відповідає гільці експерименту, що розглядається; X_i^0 – основний рівень i -того фактору $X_i^0 = (X_{i,\max} + X_{i,\min})/2$; h_i – інтервал варіювання i -того фактору $h_i = (X_{i,\max} - X_{i,\min})/2$. У подальшому присвоїмо наступну відповідність фізичних величин факторам $X_1 = S$ – площа ЗП, га (1 га = 10^4 м²); $X_2 = b$ – розмір чарунки сітки, м; $X_3 = p$ – периметр перерізу заземлювачів, мм; $X_4 = \rho$ – еквівалентний питомий опір ґрунту, Ом×м; $X_5 = I$ – струм КЗ, кА.

Причому на ділянці області значень $I_2 = [10; 40]$ кА опір ЗП практично не залежить від струму КЗ, тому п'ятифакторний експеримент спрощується до чотирьохфакторного (гілки 1 – 6).

Гілка 1. Умови: $1 \leq S \leq 3$ га (ділянка 1 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $32 \leq p \leq 92$ мм (ділянка 1 з 2); $21 \leq \rho \leq 251$ Ом×м; $10 \leq I \leq 40$ кА (ділянка 2 з 2). Опір ЗП визначається за формулою, Ом

$$R = 0,5196 - 0,1438 x_1 + 0,0330 x_2 - 0,0058 x_3 + 0,4298 x_4 - 0,0132 x_1 x_2 - 0,1226 x_1 x_4 + 0,0239 x_2 x_4 - 0,0117 x_1 x_2 x_4. \quad (22)$$

де R – опір ЗП, Ом; x_1, x_2, x_3, x_4 – кодовані значення факторів, визначені згідно з (21).

Гілка 2. Умови: $3 \leq S \leq 5$ га (ділянка 2 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $32 \leq p \leq 92$ мм (ділянка 1 з 2); $21 \leq \rho \leq 251$ Ом×м; $10 \leq I \leq 40$ кА (ділянка 2 з 2). Опір ЗП визначається за формулою, Ом

$$R = 0,3341 - 0,0417 x_1 + 0,0177 x_2 - 0,0066 x_3 + 0,2713 x_4 - 0,0021 x_1 x_2 - 0,0358 x_1 x_4 - 0,0031 x_2 x_3 + 0,0100 x_2 x_4 - 0,0021 x_1 x_2 x_4. \quad (23)$$

Гілка 3. Умови: $5 \leq S \leq 9$ га (ділянка 3 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $32 \leq p \leq 92$ мм (ділянка 1 з 2); $21 \leq \rho \leq 251$ Ом×м; $10 \leq I \leq 40$ кА (ділянка 2 з 2). Опір ЗП визначається за формулою, Ом

$$R = 0,2566 - 0,0357 x_1 + 0,0140 x_2 - 0,0071 x_3 + 0,2047 x_4 - 0,0015 x_1 x_2 - 0,0309 x_1 x_4 - 0,0034 x_2 x_3 + 0,0064 x_2 x_4 - 0,0016 x_1 x_2 x_4. \quad (24)$$

Гілка 4. Умови: $1 \leq S \leq 3$ га (ділянка 1 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $92 \leq p \leq 152$ мм (ділянка 2 з 2); $21 \leq \rho \leq 251$ Ом×м; $10 \leq I \leq 40$ кА (ділянка 2 з 2). Опір ЗП визначається за формулою, Ом:

$$R = 0,5128 - 0,1444 x_1 + 0,0300 x_2 + 0,4298 x_4 - 0,0137 x_1 x_2 - 0,1226 x_1 x_4 + 0,0240 x_2 x_4 - 0,0118 x_1 x_2 x_4. \quad (25)$$

Гілка 5. Умови: $3 \leq S \leq 5$ га (ділянка 2 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $92 \leq p \leq 152$ мм (ділянка 2 з 2); $21 \leq \rho \leq 251$ Ом×м; $10 \leq I \leq 40$ кА (ділянка 2 з 2). Опір ЗП визначається за формулою, Ом

$$R = 0,3263 - 0,0420 x_1 + 0,0140 x_2 + 0,2714 x_4 - 0,0023 x_1 x_2 - 0,0358 x_1 x_4 + 0,0101 x_2 x_4 - 0,0021 x_1 x_2 x_4. \quad (26)$$

Гілка 6. Умови: $5 \leq S \leq 9$ га (ділянка 3 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $92 \leq p \leq 152$ мм (ділянка 2 з 2); $21 \leq \rho \leq 251$ Ом×м; $10 \leq I \leq 40$ кА (ділянка 2 з 2). Опір ЗП визначається за формулою, Ом

$$R = 0,2482 - 0,0361 x_1 + 0,0101 x_2 + 0,2048 x_4 - 0,0017 x_1 x_2 - 0,0309 x_1 x_4 + 0,0064 x_2 x_4 - 0,0016 x_1 x_2 x_4. \quad (27)$$

Гілка 7. Умови: $1 \leq S \leq 3$ га (ділянка 1 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $32 \leq p \leq 92$ мм (ділянка 1 з 2); $21 \leq \rho \leq 251$ Ом×м; $1 \leq I \leq 10$ кА (ділянка 1 з 2). Опір ЗП визначається за формулою, Ом

$$R = 0,5232 - 0,1430 x_1 + 0,0344 x_2 - 0,0064 x_3 + 0,4296 x_4 - 0,0032 x_5 - 0,0129 x_1 x_2 - 0,1227 x_1 x_4 - 0,0025 x_2 x_3 + 0,0238 x_2 x_4 - 0,0119 x_1 x_2 x_4, \quad (28)$$

де x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – кодовані значення факторів, визначені згідно з (21).

Гілка 8. Умови: $3 \leq S \leq 5$ га (ділянка 2 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $32 \leq p \leq 92$ мм (ділянка 1 з 2);

$$21 \leq \rho \leq 251 \text{ Ом}\cdot\text{м}; 1 \leq I \leq 10 \text{ кА (ділянка 1 з 2)}. \text{ Опір ЗП визначається за формулою, Ом}$$

$$R = 0,3388 - 0,0414 x_1 + 0,0196 x_2 - 0,0077 x_3 + 0,2710 x_4 - 0,0040 x_5 - 0,0019 x_1 x_2 -$$

$$- 0,0359 x_1 x_4 - 0,0032 x_2 x_3 + 0,0098 x_2 x_4 - 0,0019 x_2 x_5 - 0,0021 x_1 x_2 x_4. \quad (29)$$

Гілка 9. Умови: $5 \leq S \leq 9$ га (ділянка 3 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $32 \leq p \leq 92$ мм (ділянка 1 з 2); $21 \leq \rho \leq 251 \text{ Ом}\cdot\text{м}; 1 \leq I \leq 10 \text{ кА (ділянка 1 з 2)}$. Опір ЗП визначається за формулою, Ом

$$R = 0,2622 - 0,0353 x_1 + 0,0166 x_2 - 0,0086 x_3 + 0,2042 x_4 - 0,0046 x_5 - 0,0011 x_1 x_2 -$$

$$- 0,0309 x_1 x_4 - 0,0036 x_2 x_3 + 0,0061 x_2 x_4 - 0,0024 x_2 x_5 + 0,0015 x_3 x_5 - 0,0016 x_1 x_2 x_4. \quad (30)$$

Гілка 10. Умови: $1 \leq S \leq 3$ га (ділянка 1 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $92 \leq p \leq 152$ мм (ділянка 2 з 2); $21 \leq \rho \leq 251 \text{ Ом}\cdot\text{м}; 1 \leq I \leq 10 \text{ кА (ділянка 1 з 2)}$. Опір ЗП визначається за формулою, Ом

$$R = 0,5153 - 0,1441 x_1 + 0,0313 x_2 + 0,4297 x_4 - 0,0021 x_5 -$$

$$- 0,0134 x_1 x_2 - 0,1226 x_1 x_4 + 0,0239 x_2 x_4 - 0,0119 x_1 x_2 x_4. \quad (31)$$

Гілка 11. Умови: $3 \leq S \leq 5$ га (ділянка 2 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $92 \leq p \leq 152$ мм (ділянка 2 з 2); $21 \leq \rho \leq 251 \text{ Ом}\cdot\text{м}; 1 \leq I \leq 10 \text{ кА (ділянка 1 з 2)}$. Опір ЗП визначається за формулою, Ом

$$R = 0,3294 - 0,0419 x_1 + 0,0157 x_2 - 0,0018 x_3 + 0,2713 x_4 - 0,0024 x_5 -$$

$$- 0,0022 x_1 x_2 - 0,0358 x_1 x_4 + 0,0099 x_2 x_4 - 0,0015 x_2 x_5 - 0,0021 x_1 x_2 x_4. \quad (32)$$

Гілка 12. Умови: $5 \leq S \leq 9$ га (ділянка 3 з 3); $5 \leq b \leq 25$ м; $92 \leq p \leq 152$ мм (ділянка 2 з 2); $21 \leq \rho \leq 251 \text{ Ом}\cdot\text{м}; 1 \leq I \leq 10 \text{ кА (ділянка 1 з 2)}$. Опір ЗП визначається за формулою, Ом

$$R = 0,2516 - 0,0359 x_1 + 0,0121 x_2 - 0,0020 x_3 + 0,2046 x_4 - 0,0026 x_5 -$$

$$- 0,0015 x_1 x_2 - 0,0309 x_1 x_4 + 0,0062 x_2 x_4 - 0,0017 x_2 x_5 - 0,0016 x_1 x_2 x_4. \quad (33)$$

Отримані рівняння регресії дають змогу підвищити точність визначення опору ЗП з рівномірною сіткою для підстанцій з ВРП-330(220) кВ з урахуванням всіх незалежних факторів, зазначених вище, та розділення області значень периметру перерізу заземлювачів на дві ділянки у порівнянні з ПФЕ, проведеним в роботі [2].

Задля оцінки похибки проведемо розрахунково-графічне порівняння розробленого способу визначення опору ЗП з відомими формулами. Похибка визначення опору ЗП від розміру чарунки сітки $\delta = f(b)$ визначається за формулою (16), де: R_0 – опір ЗП, визначений за базовою моделлю, в якій прийнято результати розрахунку програмним комплексом LiGro [8], Ом; R_1 – опір ЗП, визначений за формулами (1), (2) Двайта, (4) Лорана та Неймана, (5) Свєрака, (9) Оллендорфа-Лорана, (13) Шварца для квадратної сітки, ПФЕ роботи [2] та формулами (22) – (33), Ом.

У табл. 2 наведено результати розрахунку $R = f(b)$ та $\delta = f(b)$ для двох ЗП, у яких однаковими є периметр перерізу заземлювачів $p = 92$ мм та питомий опір ґрунту $\rho = 80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а різними – площа ЗП та струм КЗ. На рис. 3 та 4 наведено графіки $R = f(b)$, а на рис. 5 та 6 – графіки $\delta = f(b)$ за даними табл. 2 для вказаних ЗП. На рис. 3 – 6 цифрами позначено залежності: 1 – за формулою (1) Карякіна; 2 – за формулою (9) Оллендорфа-Лорана; 3 – за формулою (4) Лорана та Неймана; 4 – за формулою (13) Шварца; 5 – за формулою (2) Двайта; 6 – за формулою (5) Свєрака; 7 – за формулами ПФЕ роботи [2]; 8 – за формулами (22) – (33) ПФЕ; 9 – визначені за допомогою програмного комплексу LiGro.

Таблиця 2

Параметри ЗП	$S = 5 \times 10^4 \text{ м}^2, I = 21 \text{ кА}$						$S = 1 \times 10^4 \text{ м}^2, I = 3 \text{ кА}$							
	Розрахункова величина			$R, \text{ Ом, (рис. 3)}$			$\delta, \%, \text{ (рис. 5)}$			$R, \text{ Ом, (рис. 4)}$			$\delta, \%, \text{ (рис. 6)}$	
Розмір чарунки сітки $b, \text{ м}$	5	15	25	5	15	25	5	15	25	5	15	25		
1 формула (1)	0,1789	0,1789	0,1789	-11,18	-4,61	1,33	0,4000	0,4000	0,4000	-10,10	-2,99	4,08		
2 формула (9)	0,1618	0,1692	0,1759	-0,57	1,08	2,98	0,3695	0,4027	0,4305	-1,72	-3,67	-3,24		
3 формула (4)	0,1624	0,1698	0,1765	-0,96	0,71	2,64	0,3735	0,4067	0,4345	-2,82	-4,70	-4,19		
4 формула (13)	0,1632	0,1734	0,1812	-1,43	-1,38	0,04	0,3749	0,4045	0,4236	-3,20	-4,14	-1,58		
5 формула (2)	0,1585	0,1585	0,1585	1,47	7,29	12,56	0,3545	0,3545	0,3545	2,43	8,73	14,99		
6 формула (5)	0,1628	0,1701	0,1769	-0,22	0,50	2,44	0,3714	0,4045	0,4323	-2,23	-4,15	-3,68		
7 формули ПФЕ [2]	0,1653	0,1764	0,1875	-2,75	-3,17	-3,42	0,3682	0,3976	0,4270	-1,35	-2,37	-2,40		
8 формули (22) – (33)	0,1616	0,1695	0,1774	-0,45	0,86	2,14	0,3644	0,3916	0,4189	-0,30	-0,82	-0,46		
9 Комплекс LiGro	0,1609	0,1710	0,1813	0	0	0	0,3633	0,3884	0,4170	0	0	0		

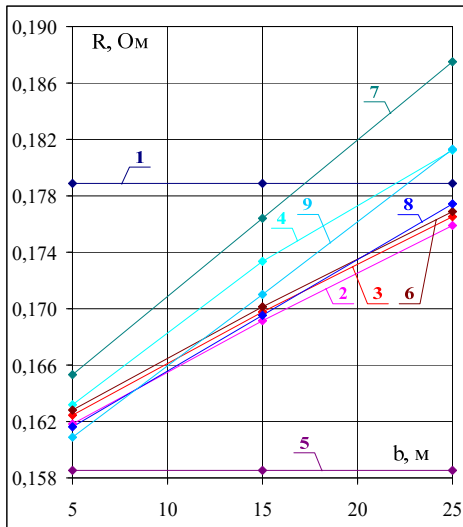


Рис. 3

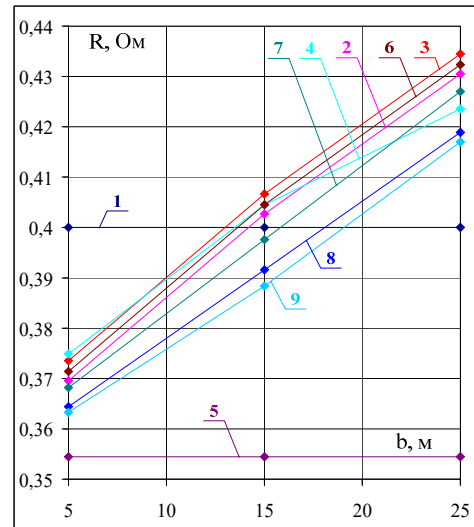


Рис. 4

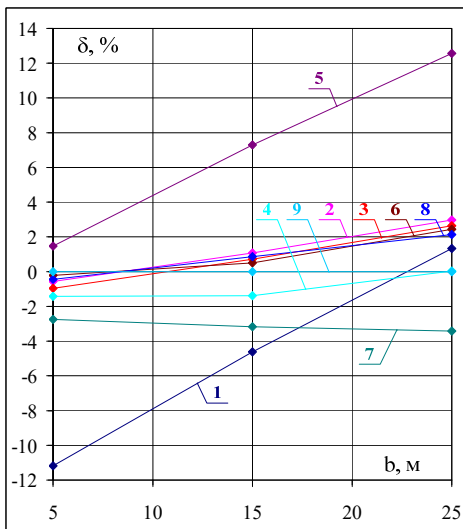


Рис. 5

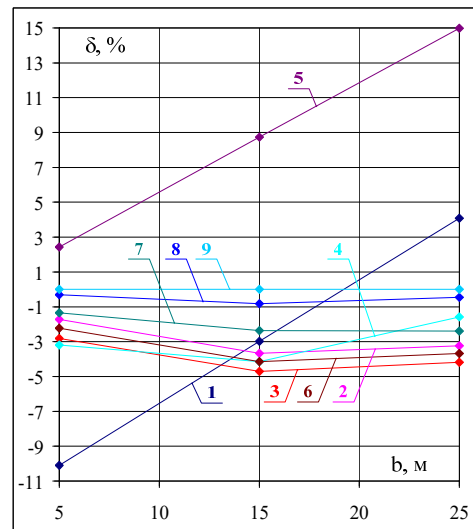


Рис. 6

Аналіз графіків $R = f(b)$ та $\delta = f(b)$ підстанції з параметрами $S = 5 \times 10^4 \text{ м}^2$, $I = 21 \text{ кА}$ показує, що графіки 2, 3, 4, 6 та 8 мають похибку $\delta = f(b)$ не більше 3% за обраної базової моделі – графік 9 (табл. 2 та рис. 5). Графік 1 залежно від значень площі ЗП та розміру чарунки може давати як занижений опір ЗП, так і завищений, а графік 5 дає занижений опір ЗП незалежно від значень вказаних факторів (рис. 3 та рис. 4). Графік 7 (рис. 3) розташований значно вище за графіки 2, 3, 6 та 8 внаслідок того, що під час проведення ПФЕ роботи [2] область значень периметру перерізу заземлювачів не була розділена на ділянки, тому вказана модель в діапазоні від 70 мм до 95 мм цього фактору має похибку, близьку до максимального значення (рис. 2). Графік 4 на рис. 3 знаходиться між графіком 7 та групою графіків 2, 3, 6 та 8. Це можна пояснити тим, що формула Шварца враховує практично всі параметри, що і формули ПФЕ, за винятком струму КЗ. У разі зменшення площі ЗП графік 4 знаходиться вже в загальній групі (рис. 4). Аналіз графіків $\delta = f(b)$ підстанції з параметрами $S = 5 \times 10^4 \text{ м}^2$ показує (рис. 5), що найбільшу похибку $\delta = 12,56\%$ має графік 5 за $b = 25 \text{ м}$, а також графік 1, похибка якого сягає $\delta = -11,18\%$ за $b = 5 \text{ м}$. Для підстанції з $S = 1 \times 10^4 \text{ м}^2$ (рис. 6) найбільшу похибку $\delta = 14,99\%$ має графік 5 за $b = 25 \text{ м}$, а також графік 1, похибка якого сягає $\delta = -10,10\%$ у разі $b = 5 \text{ м}$.

Для підстанцій зі струмом КЗ $I \geq 10 \text{ кА}$ опір ЗП практично не залежить від струму КЗ, тому на рис. 3 та рис. 5 за $I = 21 \text{ кА}$ всі графіки знаходяться в однакових умовах від залежності $R = f(I)$. Цього не можна сказати про графіки 7 та 8 на рис. 4 та рис. 6 за $I = 3 \text{ кА}$, тому що вони враховують залежність $R = f(I)$ на відміну від графіків 1 – 6. При цьому графік 8 має найменшу похибку серед усіх інших (рис. 6, максимальне значення $\delta = -0,82\%$ за $b = 15 \text{ м}$). Таким чином, розроблений в даній роботі спосіб визначення опору ЗП має найменшу похибку порівняно з відомими формулами Лорана та Не-

Ймана, Оллендорфа-Лорана, Шварца та Свєрака, що досягається урахуванням більшої кількості незалежних факторів, які мають вагомий вплив на опір ЗП.

Висновки.

1. Проведено порівняльний аналіз результатів визначення опору заземлювального пристрою з використанням різних формул: Карякіна; Оллендорфа Лорана; Лорана та Неймана; Шварца; Свєрака; Двайта; багатфакторних експериментів.

2. Наведено результати повного дворівневого факторного експерименту для визначення залежності опору заземлювального пристрою з рівномірною сіткою від п'яти незалежних факторів: площі заземлювального пристрою; розміру чарунки сітки; периметру перерізу заземлювачів; еквівалентного питомого опору ґрунту; струму однофазного замикання. При цьому, для зменшення похибки було запропоновано область значень площі заземлювального пристрою розділити на три ділянки, а струму однофазного замикання та периметру перерізу заземлювачів – на дві.

3. Проведено розрахунково-графічне порівняння результатів визначення опору ЗП за розглянутими формулами. Показано, що розроблений в цій роботі спосіб визначення опору ЗП має незначну похибку порівняно з базовою моделлю та має переваги перед відомими формулами Лорана та Неймана, Оллендорфа-Лорана, Шварца, Свєрака та Двайта.

4. Показано, що залежність опору ЗП від струму КЗ може значно впливати на опір ЗП, виконаний зі сталевого прокату, в діапазоні значень від 1 кА до 10 кА незалежно від площі ЗП.

Розроблений спосіб визначення опору ЗП рекомендується авторами при проектуванні заземлювальних пристроїв з фіксованою чарункою підстанцій класу напруги 220 кВ та вище.

1. Правила улаштування електроустановок. Харків: Міненерговугілля України, 2017. 760 с.
2. Глебов О.Ю. Вдосконалення заземлювальних пристроїв електричних підстанцій для забезпечення безаварійної роботи вторинних кіл: дис. канд. техн. наук: 05.14.02. НТУ ХПІ. Харків. 2019. 208 с.
3. Карякин Р.Н. Сопротивление растеканию контуров заземления тяговых подстанций переменного тока. *Электричество*. 1966. № 3. С. 54-56.
4. IEEE Std 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York: IEEE, 2013. 226 p.
5. Silva C.L.B., Pires T.G., Calixto W.P., Oliveira D.N., Souza L.A.P., Silva Filho A.M. Calculation of Grounding Grids Parameter at Arbitrary Geometry. *Transactions on environment and electrical engineering*. 2017. Vol. 2. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.22149/tee.v2i2.95>.
6. Al-Shawesh Y., Lim S.C., Nujaim M. Analysis of the design calculations for electrical earthing systems. *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*. 2021. Vol. 16. No 2. Pp. 104-117. DOI: <https://doi.org/10.15866/iree.v16i2.16839>.
7. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Saliba A.N. Determination of the scope of the experimental-calculation method for measuring the touch voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023. No 1. Pp. 77-82. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.1.11>.
8. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Експериментальне обґрунтування методики розрахунку нормованих параметрів заземлювального пристрою на основі тришарової моделі ґрунту. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 1. С. 66-70. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.11>.
9. Gelman A., Hill J. Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models. Cambridge University Press, 2006. 648 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790942>.

DETERMINATION OF THE RESISTANCE OF GROUNDING DEVICES OF SUBSTATIONS 330(220) kV

O.Yu. Glebov, D.G. Koliushko, A.V. Plichko, S.S. Rudenko
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
Kirpychova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.
E-mail: nio5_molniya@ukr.net

In the electric power industry of Ukraine, the main system-forming objects are power transmission lines and substations with 330(220) kV switchgear. The most powerful sources of danger at substations are short circuits on the busbars, a direct lightning strike or the operation of overvoltage limiters and arresters. The purpose of the article is to develop a method for determining the resistance of the grounding system of substations with open switchgear 330(220) kV, aimed at increasing accuracy, taking into account the most influential independent factors. The provisions of the theory of experiment planning, the theory of electric circuits, mathematical modeling in the package Grounding 1.0, LiGro and Microsoft Excel were used to conduct the research. In the paper, a comparative analysis of the known formulas for determining the resistance of the grounding system is carried out: the formula of the GOST 12.1.30-81 standard, Ohlendorf-Laurant, Laurent

and Neumann, Schwartz, Sverak formulas, as well as the formula of the international standard IEEE Std 80-2013. The results of multifactorial experiments to determine the dependence of the resistance of the grounding system on its area, the size of the grid cell, the perimeter of the cross-section of the grounding, the equivalent specific resistance of the soil, the short-circuit current and the depth of the grid location are given. A graphical comparison of the results of determining the resistance according to the considered formulas was carried out. In the paper, the method of determining the parameters of grounding system of 330(220) kV substations was further developed, aimed at ensuring standardized values of the resistance of the grounding system and the ground potential rise using formulas obtained from the results of multifactorial experiments. The results obtained in the work will make it possible to reduce the probability of damage to the insulation of 6-10 kV cables, as well as cables of secondary circuits from low-frequency and high-frequency (pulse) voltages when large currents flow into the grounding system in the mode of a single-phase short-circuit to the ground in electrical grid with a grounded neutral. References 9, tables 2, figures 6.

Key words: substation, grounding system, grounding systems resistance, ground potential rise, full factorial experiment.

1. Rules of the device electroinstallations. General rules. Kharkiv: Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2017. 760 p. (Ukr)
2. Glebov O.Yu. Improvement of grounding systems of electric substations to ensure trouble-free operation of secondary circuits: Cand. tech. sci. diss.: 05.14.02. National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute. Kharkiv. 2019. 208 p. (Ukr)
3. Karyakin R.N. Resistance of grounding grids of traction substations of alternating current. *Elektrichestvo*. 1966. No 3. Pp. 64-66. (Rus)
4. IEEE Std 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York: IEEE, 2013. 226 p.
5. Silva C.L. B., Pires T.G., Calixto W.P., Oliveira D.N., Souza L.A.P., Silva Filho A.M. Calculation of Grounding Grids Parameter at Arbitrary Geometry. *Transactions on environment and electrical engineering*. 2017. Vol. 2. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.22149/tee.v2i2.95>.
6. Al-Shawesh Y., Lim S.C., Nujaim M. Analysis of the design calculations for electrical earthing systems. *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*. 2021. Vol. 16. No 2. Pp. 104-117. DOI: <https://doi.org/10.15866/iree.v16i2.16839>.
7. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Saliba A.N. Determination of the scope of the experimental-calculation method for measuring the touch voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023. No 1. Pp. 77-82. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.1.11>.
8. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Experimental substantiation of the calculation procedure of normalized parameters of grounding device based on the three-layer soil model. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2018. No 1. Pp. 66-70. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.11>. (Ukr)
9. Gelman A., Hill J. Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models. Cambridge University Press, 2006. 648 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790942>.

Надійшла 14.03.2023
Остаточний варіант 29.05.2023