

Застосування методу еквівалентування багатошарового ґрунту при визначенні нормованих параметрів заземлювального пристрою

Вступ. Нормовані параметри заземлювального пристрою, такі як напруга дотику та опір, є критично важливими для забезпечення електричної безпеки та надійності роботи електростанцій та підстанцій. Складність багатошарової структури ґрунту створює проблеми для визначення вказаних параметрів. Це обумовлено тим, що реальні ґрунти на території енергооб'єктів України мають три і більше шарів, а нормовані параметри визначаються програмними засобами з двошаровими розрахунковими моделями. Тому необхідність еквівалентування багатошарових геоелектричних структур у двошарові моделі для практичного застосування є актуальною задачею. **Мета.** Визначення меж застосування методу еквівалентування багатошарових ґрунтів на основі аналізу результатів розрахунку нормованих параметрів заземлювального пристрою. **Методологія.** У дослідженні розглянуто тришарову модель для чотирьох типів ґрунту (А, Н, Q, К), поширених в Україні. Розрахунки виконано за допомогою програмного комплексу LiGro, який базується на методі інтегро-диференціальних рівнянь, застосованому для аналітичного вирішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела струму в тришаровому провідному напівпросторі. В якості критерію можливості застосування методу еквівалентування обрано величину відносної похибки в 10 % при визначенні нормованих параметрів заземлювального пристрою заданої топології та типу ґрунту. При визначенні похибки за істинне значення приймалися результати розрахунку у вихідній тришаровій структурі ґрунту для заданої топології заземлювального пристрою. **Результати** демонструють, що ефективність методу еквівалентування суттєво залежить від типу ґрунту та площі системи заземлення. Зокрема, для ґрунту типу А заміна верхнього та середнього шару еквівалентним першим шаром (нижнього – другим), забезпечує меншу похибку розрахунків опору заземлення, ніж представлення верхнього шару в якості першого, а середнього та нижнього – другого. При цьому спостерігається тенденція до зменшення похибки від –14,6 % до –2,6 % зі зростанням площі об'єкту від 225 м² до 14400 м². **Оригінальність.** Вперше представлено результати оцінки похибки методу еквівалентування багатошарових ґрунтів різних типів при розрахунку нормованих параметрів заземлювальних пристроїв. **Практична значимість.** Визначення умов та меж застосування методу еквівалентування при розрахунку нормованих параметрів заземлювальних пристроїв програмними комплексами може бути використано при проєктуванні нових або реконструкції існуючих енергооб'єктів України. Бібл. 20, табл. 5, рис. 4.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, напруга дотику, опір заземлювального пристрою, метод еквівалентування, багатошаровий ґрунт.

Вступ. Розрахунок нормованих параметрів заземлювальних пристроїв (ЗП) електричних станцій та підстанцій, а саме – опору ЗП, напруги на ЗП та напруги дотику, є важливою науково-практичною задачею як з точки зору проєктування нових енергетичних об'єктів [1–3], так і експлуатації існуючих [4]. Вихідними даними для виконання таких розрахунків є струм однофазного замикання на землю, час спрацювання основного та резервного захисту, топологія ЗП [5], матеріал та поперечний переріз заземлювачів, опір основи [6] та електрофізичні характеристики ґрунту [7]. Останній фактор практично не залежить від впливу людини і змінити його в процесі експлуатації неможливо.

У розповсюджених програмних комплексах для моделювання електромагнітних процесів у ЗП [8–13], використовується двошарова модель ґрунту із границею поділу, паралельною поверхні землі. Виходячи з того, що за результатами аналізу 612 зондувань понад 80 % ґрунтів в місцях розташування енергетичних об'єктів України мають три та більше шарів [7], виникає потреба у приведенні існуючої структури до двошарової. Зазвичай для цього використовується метод еквівалентування [12–18]. Ідея його полягає в тому, що еквівалентною вважається модель з такими характеристиками геоелектричної структури землі, за яких заземлювач матиме ті ж самі значення електричних параметрів, що й у вихідній багатошаровій структурі.

Для приведення багатошарової геоелектричної структури до еквівалентної визначаються сумарні поперечна (нормальна) і повздовжня (тангенціальна) провідності при протіканні струмів відповідних напрямків у прямокутному стовпі ґрунту заввишки h_z , з основою у вигляді квадрату зі стороною відомого розміру (наприклад, $a = 1$ м). Вирази для визначення еквівалентного питомого опору ρ_e (1) та товщини еквівалентного шару h_e (2) мають вигляд [7, 14, 15]:

$$\rho_e = \sqrt{\sum_{i=1}^m (h_i \cdot \rho_i) \times \left(\sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\rho_i} \right)^{-1}}; \quad (1)$$

$$h_e = \sqrt{\sum_{i=1}^m (h_i \cdot \rho_i) \times \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\rho_i}}, \quad (2)$$

де ρ_i та h_i – питомий електричний опір та товщина i -го шару, m – кількість шарів, що еквівалентуються.

Загалом, на практиці отримали розповсюдження три способи (див. п. 2.3.2 [3]) застосування методу еквівалентування [7]:

1. Спосіб №1 – верхній шар реальної геоелектричної структури розглядають як перший шар еквівалентної двошарової, а наступні шари еквівалентуються у другий (вважається, що даний спосіб дозволяє з найменшими похибками визначити розподіл потенціалу на поверхні ґрунту та напругу дотику).

2. Спосіб №2 – всі верхні шари реальної структури представляють у вигляді першого шару еквівалентної геоелектричної структури, а нижній – другого шару (даний спосіб прийнято використовувати при розрахунку опору і потенціалу на ЗП).

3. Спосіб №3 – всі верхні шари реальної структури до ЗП і додаткові 0,1–0,2 м представляють у вигляді першого шару еквівалентної геоелектричної структури, а нижні (або ж ті, що знаходяться нижче відносно елементів ЗП, інші шари) – другого шару.

Перший та другий способи отримані на основі фізичного сенсу нормованих параметрів: співвідношення питомого електричного опору ρ верхніх шарів найбільше впливає на значення потенціалу на поверхні ґрунту, а отже і на напругу дотику (кроку), а на опір і потенціал на заземлювачі більше впливає ρ шару, в якому знаходиться ЗП (див. п. 2.3.2 [3]). Третій спосіб отримав практичне застосування в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХП» на

основі чисельних розрахунків та порівняння експериментальних та розрахункових значень.

Проте в [9–15] відсутні наглядні відомості та аналітично-статистичні дані, які дозволили б оцінити загальний вплив еквівалентування різних типів ґрунту (А, Н, Q, К) на результати розрахунку нормованих параметрів. Отримані в [4] результати можна вважати лише попереднім аналізом для ЗП розміром $5 \times 5 \text{ м}^2$ та недостатнім для застосування у практичних цілях.

Зважаючи на те, що вказані параметри впливають на електробезпеку обслуговуючого персоналу станцій та підстанцій, а також на надійність експлуатації обладнання, систем релейного захисту та телемеханіки, дослідження такого впливу для підвищення точності їх визначення, є актуальною задачею.

Мета роботи – визначення меж застосування методу еквівалентування багат шарових ґрунтів на основі аналізу результатів розрахунку нормованих параметрів заземлювального пристрою.

Матеріали дослідження. Зважаючи на те, що в Україні в місцях розташування енергооб’єктів переважна більшість ґрунтів є тришаровими, тому доцільно розглянути саме цю геоелектричну структуру та метод її еквівалентування. Загально відомо, що тришарові ґрунти за співвідношенням питомого електричного опору шарів поділяються на чотири типи:

- Q – ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$); • А – ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$);
- Н – ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$); • К – ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$).

Виконаний у [4] аналіз відсоткового розподілу результатів експериментальних досліджень із зондування ґрунту на території енергооб’єктів України показав, що ґрунт типу Q становить 44,43 %; А – 0,84 %; Н – 31,42 %; К – 23,31 %.

Для досягнення мети у якості критерію меж застосування методу еквівалентування пропонується обрати значення відносної похибки 10 % (допустимо для вирішення практичних задач з розрахунку ЗП [6, 8, 11]) при визначенні нормованих параметрів ЗП заданої топології та типу ґрунту. Для виконання дослідження вищевказаних типів ґрунту використано програмний комплекс LiGro [17], який дозволяє визначати нормовані параметри ЗП довільної складності, що розташований у тришаровому ґрунті. Вказаний комплекс створено на основі методу інтегро-диференційних рівнянь, застосованого для аналітичного вирішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела струму в тришаровому провідному напівпросторі, з подальшим інтегруванням набору точкових джерел струму у вигляді довільно орієнтованого заземлювача.

Для виконання розрахунків використано три варіанти виконання ЗП розміром: $15 \times 15 \text{ м}^2$, $45 \times 45 \text{ м}^2$ та $120 \times 120 \text{ м}^2$. Розмір комірки в усіх випадках $3 \times 3 \text{ м}^2$ (див. табл. 1 – 4). В якості заземлювача обрано прутки із гарячекатаної сталі BSt3SP (Fe37-3FN) діаметром 14 мм з відповідними електромагнітними характеристиками. ЗП розташований на глибині 0,5 м, що відповідає вимогам нормативного документу [19].

Відповідно до [7] доцільно розглянути значення при співвідношенні $\rho^* = \rho_i / \rho_{i+1}$ в діапазоні [0,01; 10], що дозволяє охопити 99,9 % тришарових ґрунтів України в місцях розташування діючих енергооб’єктів [4]. Відповідно до [4] товщина шарів знаходиться в межах $h_1 \in [0,02; 10] \text{ м}$ для першого шару та $h_2 \in [0,01; 35] \text{ м}$ для другого. Для виконання якісного аналізу обрано середнє значення h_1 та h_2 [7]. Параметри

розглянутих вихідних тришарових та еквівалентних двошарових моделей ґрунту наведено в табл. 1 – 4. При цьому, у якості вихідної моделі ґрунту прийнято середньостатистичні значення, що отримані в [7]. Еквівалентні двошарові отримані з використанням (1) та (2).

При виконанні розрахунків прийнято, що опір основи становить 100 Ом [3], а струм однофазного замикання на землю – 10 кА. Розрахунок напруги дотику виконувався у центрі (U_{ic}) та на краю (U_{ik}) ЗП (див. табл. 1 – 4). Також визначалися опір ЗП (R_G) та напруга на ЗП (U_G). Результати розрахунку (значення U_{ic} , U_{ik} , R_G та U_G) для заданої системи заземлення, розташованої в ґрунті типу А, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку параметрів ЗП для ґрунту типу А

Параметр	Вихідна модель	Еквівалентна модель за способом:		
		№1	№2	№3
ρ_1 , Ом·м	10	10	64,3	10
h_1 , м	0,79	0,8	8,7	0,6
ρ_2 , Ом·м	100	570,3	1000	510
h_2 , м	5,46			
ρ_3 , Ом·м	1000			
ЗП $15 \times 15 \text{ м}^2$				
U_{ic} , В	91,81	73,43	848,60	92,82
R_G , Ом	3,61	3,94	4,13	4,40
U_G , В	36050,0	39420,0	41310,0	43990,0
U_{ik} , В	512,80	548,70	2183,00	635,60
ЗП $45 \times 45 \text{ м}^2$				
U_{ic} , В	34,77	39,26	111,20	38,41
R_G , Ом	2,36	2,29	2,49	2,15
U_G , В	23550,0	22940,0	24940,0	21540,0
U_{ik} , В	243,50	237,60	974,10	234,30
ЗП $120 \times 120 \text{ м}^2$				
U_{ic} , В	30,16	31,15	40,16	32,11
R_G , Ом	1,45	1,24	1,49	1,24
U_G , В	14530,0	12410,0	14910,0	12400,0
U_{ik} , В	127,70	116,20	436,30	121,60

В табл. 2 – 4 наведено результати аналогічного розрахунку для інших типів ґрунту.

Таблиця 2

Результати розрахунку параметрів ЗП для ґрунту типу Н

Параметр	Вихідна модель	Еквівалентна модель за способом:		
		№1	№2	№3
ρ_1 , Ом·м	1000	1000	39,4	1000
h_1 , м	0,8	0,8	21,7	0,6
ρ_2 , Ом·м	10	211,5	1000	212,3
h_2 , м	6,3			
ρ_3 , Ом·м	1000			
ЗП $15 \times 15 \text{ м}^2$				
U_{ic} , В	24770	21300	736,10	15860
R_G , Ом	4,60	9,08	1,84	8,06
U_G , В	46000	90820	18410	80580
U_{ik} , В	25740	28340	1270	22710
ЗП $45 \times 45 \text{ м}^2$				
U_{ic} , В	5126	4340,00	133,60	3225
R_G , Ом	1,68	2,75	1,08	2,55
U_G , В	16810	27450	10810	25470
U_{ik} , В	6270	7909	477,10	6577
ЗП $120 \times 120 \text{ м}^2$				
U_{ic} , В	467,2	594,30	36,92	446,2
R_G , Ом	0,84	0,89	0,72	0,86
U_G , В	8290	8920	7180	8644
U_{ik} , В	1466	1958	217,30	1704

Таблиця 3

Результати розрахунку параметрів ЗП для ґрунту типу Q

Параметр	Вихідна модель	Еквівалентна модель за способом:		
		№1	№2	№3
ρ_1 , Ом·м	1000	1000	155,54	1000
h_1 , м	0,8	0,8	8,7	0,6
ρ_2 , Ом·м	100	17,5	10	19,6
h_2 , м	6,3			
ρ_3 , Ом·м	10			
ЗП 15×15 м²				
U_{ic} , В	23800	24810	2953	16380
R_G , Ом	4,81	3,77	2,89	2,53
U_G , В	48120	37660	28920	25330
U_{ik} , В	26810	25850	4793	17570
ЗП 45×45 м²				
U_{ic} , В	5494	5437	812,8	530,6
R_G , Ом	1,01	0,87	0,62	0,27
U_G , В	10040	8657	6203	2680
U_{ik} , В	6127	5926	1250	935
ЗП 120×120 м²				
U_{ic} , В	861,5	815	159,8	497,7
R_G , Ом	0,19	0,18	0,13	0,16
U_G , В	1852	1772	1320	1587
U_{ik} , В	1082	1095	274,1	874,2

Таблиця 4

Результати розрахунку параметрів ЗП для ґрунту типу K

Параметр	Вихідна модель	Еквівалентна модель за способом:		
		№1	№2	№3
ρ_1 , Ом·м	10	10	253,8	10
h_1 , м	0,8	0,8	21,7	0,6
ρ_2 , Ом·м	1000	47,3	10	47,1
h_2 , м	6,3			
ρ_3 , Ом·м	10			
ЗП 15×15 м²				
U_{ic} , В	84,22	159,20	4412,00	193,50
R_G , Ом	2,29	0,95	6,00	1,01
U_G , В	22890,0	9500,0	59960,0	10090,0
U_{ik} , В	538,70	432,90	7935,00	478,90
ЗП 45×45 м²				
U_{ic} , В	51,27	56,47	1056,00	63,57
R_G , Ом	0,85	0,39	1,54	0,40
U_G , В	8542,0	3888,0	15350,0	4012,0
U_{ik} , В	200,80	165,50	2372,00	179,00
ЗП 120×120 м²				
U_{ic} , В	34,37	33,79	220,10	34,80
R_G , Ом	0,25	0,16	0,34	0,16
U_G , В	2479,0	1626,0	3364,0	1649,0
U_{ik} , В	78,17	76,61	536,10	80,03

Для проведення аналізу даних розрахункових експериментів розглянуто похибку визначення нормованих параметрів δ з використанням методу еквівалентування. За істинні значення прийняті ті, що отримані при розрахунку за допомогою моделі ЗП, розміщеного у тришаровому ґрунті. Для кожного з нормованих параметрів і відповідного типу ґрунту побудована залежність відносної похибки δ від площі ЗП S .

На рис. 1 наведена зазначена залежність для ґрунту типу А. При цьому на рис. 1,а пунктиром позначено сімейство кривих для напруги дотику з краю ЗП (U_{ik}), а суцільною – для напруги дотику в центрі ЗП (U_{ic}). Позначення №1 – №3 відповідають способам еквівалентування. На рис. 1,б суцільні криві відповідають залежності $\delta(S)$ для опору ЗП (R_G), а пунктирні – для напруги на ЗП (U_G).

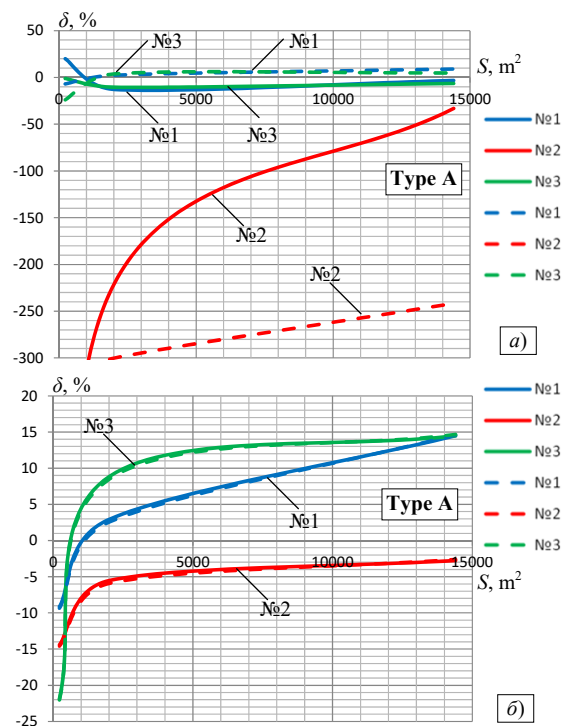


Рис. 1. Похибка визначення нормованих параметрів залежно від площі ЗП та способу еквівалентування ґрунту типу А: а – суцільна крива – U_{ic} ; пунктирна крива – U_{ik} ; б – суцільна крива – R_G ; пунктирна крива – U_G

Слід зауважити, що похибка понад 300 % на графіку не показана. За результатами моделювання для ґрунту типу А бачимо підтвердження вихідної гіпотези – спосіб №2 є досить ефективним для розрахунку напруги на ЗП та опору ЗП (при цьому похибка зменшується зі зростанням площі), а способи №1 та №3 показують достатньо високу точність при визначенні напруги дотику. При цьому в центрі ЗП кращі результати показує спосіб №3 (похибка до -10,5 %), а на краю ЗП – спосіб №1 (похибка до 9 %).

На рис. 2 наведено аналогічні результати розрахунку для ґрунту типу Н.

За результатами моделювання для ґрунту типу Н бачимо, що похибка при розрахунку напруги дотику в центрі та на краю ЗП лежить в діапазоні від -27 % до 15 % (способи еквівалентування №1 та №3). Проте виділити певний діапазон застосування для них практично неможливо. Для вказаного типу ґрунту використання методу еквівалентування для розрахунку напруги на ЗП та опору ЗП не рекомендується, хоча тенденція зменшення похибки зі збільшенням площі зберігається. При цьому, всупереч сталої думки, найменшу похибку мають способи №1 та №3 (для них абсолютне значення похибки зменшується від -97 % до -6 % та від -75 % до -4 % відповідно). Однак, в подальшому потрібно додатково дослідити їх поведінку при збільшенні площі ЗП.

На рис. 3 наведено аналогічні результати розрахунку для ґрунту типу Q. Умовні позначення аналогічні рис. 1.

За результатами моделювання для ґрунту типу Q бачимо, що лише спосіб №1 може бути застосований для розрахунку напруги дотику в центрі та з краю ЗП (похибка лежить в діапазоні від -4,2 % до 5,6 %), напруги на ЗП та опору ЗП (похибка – від 22 % до 4,3 %).

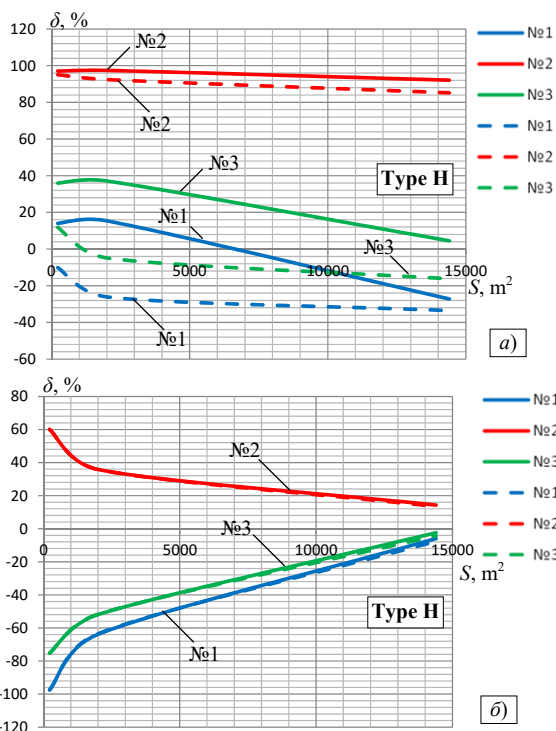


Рис. 2. Похибка визначення нормованих параметрів залежно від площі ЗП та способу еквівалентування ґрунту типу Н:
а – суцільна крива – U_{ic} ; пунктирна крива – U_{ik} ;
б – суцільна крива – R_G ; пунктирна крива – U_G

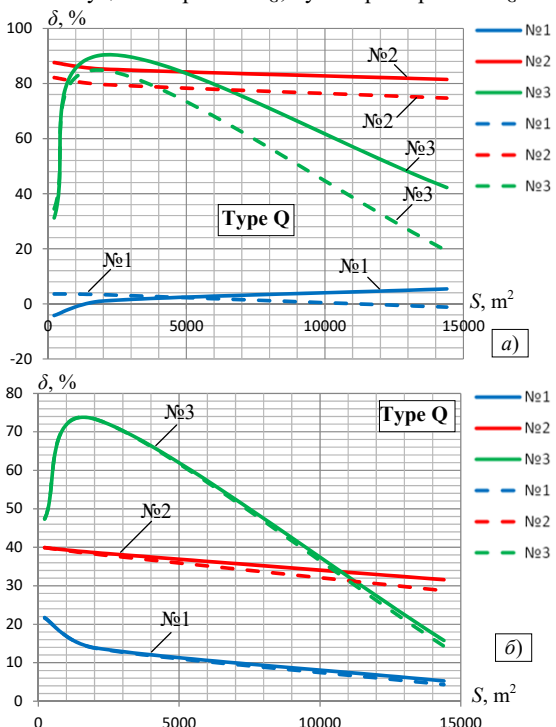


Рис. 3. Похибка визначення нормованих параметрів залежно від площі ЗП та способу еквівалентування ґрунту типу Q:
а – суцільна крива – U_{ic} ; пунктирна крива – U_{ik} ;
б – суцільна крива – R_G ; пунктирна крива – U_G

На рис. 4 наведено аналогічні результати розрахунку для ґрунту типу К. Умовні позначення аналогічні рис. 1. На рис. 4,а спосіб №2 не показаний, оскільки він дає похибку понад -500% .

За результатами моделювання для ґрунту типу К бачимо, що способи еквівалентування №1 та №3 можуть бути застосовані для розрахунку напруги дотику в центрі та на краю ЗП відповідно при площі меншій

за 2000 м^2 (похибка лежить в діапазоні від -10% до 15%). Використання методу еквівалентування для розрахунку напруги на ЗП та опору ЗП не рекомендується, хоча тенденція зменшення похибки зі збільшенням площі так само зберігається.

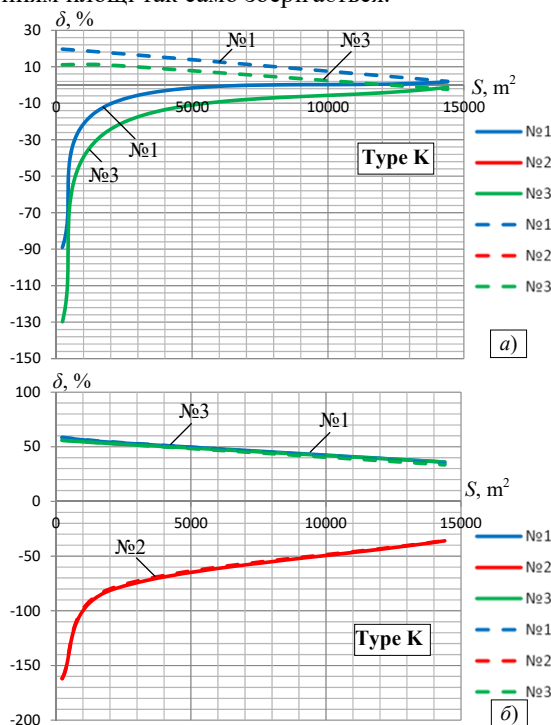


Рис. 4. Похибка визначення нормованих параметрів залежно від площі ЗП та способу еквівалентування ґрунту типу К:
а – суцільна крива – U_{ic} ; пунктирна крива – U_{ik} ;
б – суцільна крива – R_G ; пунктирна крива – U_G

За результатами аналізу рис. 1 – 4 можемо сформулювати наступний алгоритм вибору способу еквівалентування для розрахунку певного нормованого параметру ЗП залежно від типу ґрунту (див. табл. 5). Принцип формування табл. 5 полягав у наступному: якщо для певного типу ґрунту при розрахунку одного з нормованих параметрів досягається умова

$$|\delta| \leq 10\%, \quad (3)$$

то вказується номер відповідного способу еквівалентування та він визнається прийнятним до використання.

Якщо є певні обмеження щодо площі ЗП, для якої досягається умова (3), то спосіб приймається умовно прийнятним, а обмеження наведено в примітці. Якщо умова (3) не виконується, то спосіб вважається неприйнятним, а в табл. 5 вказується «—».

Таблиця 5
Рекомендації щодо алгоритму вибору способу еквівалентування

Тип ґрунту / Параметр ЗП	U_{ic}	U_{ik}	R_G	U_G
Тип А ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$)	3	1	2*	2*
Тип Н ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$)	—	—	—	—
Тип Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$)	1	1	—	—
Тип К ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)	1**	3**	—	—

Примітка: * – допустимо при $S > 1000 \text{ м}^2$;

** – допустимо при $S > 2000 \text{ м}^2$.

Застосування запропонованого алгоритму вибору способу еквівалентування розглянуто на прикладі в Додатку 1.

Висновки.

1. На основі серії розрахункових експериментів та аналізу отриманих значень нормованих параметрів заземлювального пристрою встановлено:

– для ґрунту типу А способи №1 (верхній шар реальної геоелектричної структури – перший шар еквівален-

тної двошарової, а наступні шари еквівалентовані у другий та №3 (всі верхні шари реальної структури до ЗП і додаткові 0,1–0,2 м – перший шар еквівалентної структури, а наступні – другий шар) можна застосовувати при визначенні напруги дотику, де спосіб №3 кращий для центру ЗП (похибка до –10,5 %), а спосіб №1 – для краю ЗП (похибка до 9 %). Спосіб №2 (верхні шари реальної структури – перший шар еквівалентної структури, а нижній – другий) для розрахунку напруги та опору ЗП допускається застосовувати при площі понад 1000 м²;

– для ґрунту типу Н жоден зі способів еквівалентування не дозволяє виконати розрахунок з похибкою менше 10 %;

– для типів ґрунтів Q та K метод еквівалентування можна застосовувати лише для розрахунку напруги дотику. При цьому для Q слід використовувати спосіб еквівалентування №1 (похибка від –4,2 % до 5,6 %). Для типу K спосіб №1 кращий для центру ЗП, а спосіб №3 – для краю ЗП при площі понад 2000 м².

2. Незалежно від типу ґрунту при визначенні опору ЗП та напруги на ЗП у всіх випадках спостерігається зменшення похибки з ростом площі ЗП, що свідчить про можливість поліпшення точності розрахунків для об'єктів площею понад 10 000 м².

3. На основі аналізу результатів моделювання сформовано алгоритм вибору способу еквівалентування для розрахунку певного нормованого параметру ЗП залежно від типу ґрунту. Як критерій прийнятності обрано відносну похибку в межах ± 10 %. При цьому залежно від типу ґрунту та параметру ЗП, що визначається, способи розподілено на прийнятний, неприйнятний та умовно прийнятний (з урахуванням обмеження щодо площі ЗП).

4. Зважаючи на те, що повноцінний розрахунок усіх нормованих параметрів з використанням методу еквівалентування можна виконати лише для ґрунту типу А, то найбільш доцільним є використання програмних комплексів, які дозволяють врахувати тришарову структуру ґрунту, в процесі визначення нормованих параметрів ЗП.

ДОДАТОК 1

Приклад застосування запропонованого алгоритму вибору способу еквівалентування. Вихідний об'єкт має розмір 120×65 м² з глибиною розташування ЗП – 0,6 м. Параметри ґрунту: $\rho_1 = 53,9$ Ом·м; $\rho_2 = 117$ Ом·м; $\rho_3 = 12,3$ Ом·м; $h_1 = 1,2$ м; $h_2 = 12,3$ м. Відповідно, ЗП розташований у першому шарі.

Наведені параметри ґрунту відповідають ґрунту типу К, а площа ЗП складає 7800 м² й відповідає умові $S > 2000$ м². Отже, для визначення напруги дотику в центрі ЗП (U_{ic}) слід скористатися способом еквівалентування №1 за виразами (1) і (2), за результатами застосування якого параметри еквівалентної моделі будуть складати: $\rho_{1e} = 53,9$ Ом·м; $\rho_{2e} = 32,18$ Ом·м; $h_{1e} = 1,2$ м. Для визначення напруги дотику на краю ЗП (U_{ik}) способом еквівалентування №3: $\rho_{1e} = 53,9$ Ом·м; $\rho_{2e} = 32,32$ Ом·м; $h_{1e} = 0,8$ м. У випадку необхідності визначення напруги на ЗП та опору ЗП слід використовувати тришарову модель ґрунту.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang Y., Jiang J., Huang Y., Wang J. Design of substation grounding grid in CFETR. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, art. no. 25009. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76764-5>.

2. Chiliquinga W., Robles P. Considerations in the design of electrical substations, including the effect of potential gradient on surrounding metallic structures. *Ingenius*, 2022, no. 28, pp. 9-24. doi: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.01>. (Esp).
3. Волков В.П., Бондаренко В.С. *Расчет и проектирование заземляющих устройств электроустановок высокого напряжения: Учебное пособие*. Київ, УМК ВО, 1990. 116 с.
4. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Analysis of methods for monitoring of existing energy objects grounding devices state at the present stage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 1, pp. 67-72. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.1.11>.
5. Koliushko D.G., Rudenko S.S. The factors of the influence on the touch voltage from the review of the development of recommendations for the reconstruction of the grounding device. *Technical Electrodynamics*, 2019, no. 3, pp. 29-36. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.029>.
6. Nahman J., Paunovic I. Effects of the Local Soil Nonuniformity Upon Performances of Ground Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 2180-2184. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905284>.
7. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 3, pp. 67-72. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.3.10>.
8. Turri R., Andolfato R., Cuccarollo D. A numerical simulation tool for cathodic protection and electromagnetic interference analysis. *NACE Milano Italia Section – Conference & Expo 2016 «A European event for the Corrosion Prevention of Oil&Gas industry»*. 17 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/303685228_A_NUME (accessed 10 April 2022).
9. Hossain M.S., Ahmed R., Hossain S. Design and Optimization of Substation Grounding Grid for Ensuring the Safety of Personnel and Equipment. *Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 71-80. doi: <https://doi.org/10.26855/jepes.2021.08.001>.
10. Pereira Sodre R., Lopes Pereira B., Leite Sidrim L., Almeida J.F., Souza Sobrinho C.L.S. Optimization of Grounding Grids Design for a Square-Shaped Mesh. *IEEE Latin America Transactions*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 135-139. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8291465>.
11. Cardoso C., Rocha L., Leiria A., Teixeira P. Validation of an integrated methodology for design of grounding systems through field measurements. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017, vol. 2017, no. 1, pp. 897-901. doi: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0452>.
12. *IEEE Std 80-2013 Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, IEEE, 2013. 226 p. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7109078>.
13. *IEEE Std 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York, IEEE, 2012. 74 p. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392181>.
14. Permal N., Osman M., Ariffin A.M., Abidin Ab Kadir M.Z. Effect of Non-Homogeneous Soil Characteristics on Substation Grounding-Grid Performances: A Review. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 16, art. no. 7468. doi: <https://doi.org/10.3390/app11167468>.
15. Nikolovski S., Knežević G., Baus Z. Assessment of Step and Touch Voltages for Different Multilayer Soil Models of Complex Grounding Grid. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2016, vol. 6, no. 4, pp. 1441-1455. doi: <https://doi.org/10.11591/ijece.v6i4.pp1441-1455>.
16. Malanda S.C., Davidson I.E., Singh E., Buraimoh E. Analysis of Soil Resistivity and its Impact on Grounding Systems Design. *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2018, pp. 324-329. doi: <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica.2018.8520960>.
17. Dilushani P.D.R., Nawodani W.R.N., Bambaravanage T., Udayakumar K.A.C. Soil Resistivity Analysis and Earth Electrode Resistance Determination. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 26-35. doi: <https://doi.org/10.9790/1676-1502012635>.
18. Alotto P., Torchio R., Andolfato R., Cuccarollo D. Identification of Multilayer Soil Models for Grounding Systems from Surface Measurements. *Technical Report*, 2018. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35135.15526>.
19. *Правила улаштування електроустановок*. Київ, Міненерговугілля України, 2017. 760 с.
20. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Istomin O.Ye., Saliba A.N. Simulation of electromagnetic processes in the grounding system with a short circuit in the operating high-voltage substation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 4, pp. 75-80. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.4.11>.

REFERENCES

- Wang Y., Jiang J., Huang Y., Wang J. Design of substation grounding grid in CFETR. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, art. no. 25009. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76764-5>.
- Chiliquinga W., Robles P. Considerations in the design of electrical substations, including the effect of potential gradient on surrounding metallic structures. *Ingenius*, 2022, no. 28, pp. 9-24. doi: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.01>. (Esp).
- Volkov V.P., Bondarenko V.E. *Calculation and design of grounding devices for high-voltage electrical installations: Textbook*. Kyiv, UMK VO, 1990. 116 p. (Rus).
- Koliushko D.G., Rudenko S.S. Analysis of methods for monitoring of existing energy objects grounding devices state at the present stage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 1, pp. 67-72. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.1.11>.
- Koliushko D.G., Rudenko S.S. The factors of the influence on the touch voltage from the review of the development of recommendations for the reconstruction of the grounding device. *Technical Electrodynamics*, 2019, no. 3, pp. 29-36. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.029>.
- Nahman J., Paunovic I. Effects of the Local Soil Nonuniformity Upon Performances of Ground Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 2180-2184. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905284>.
- Koliushko D.G., Rudenko S.S. Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 3, pp. 67-72. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.3.10>.
- Turri R., Andolfato R., Cuccarollo D. A numerical simulation tool for cathodic protection and electromagnetic interference analysis. *NACE Milano Italia Section – Conference & Expo 2016 «A European event for the Corrosion Prevention of Oil&Gas industry»*. 17 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/303685228_A_NUME (accessed 10 April 2022).
- Hossain M.S., Ahmed R., Hossain S. Design and Optimization of Substation Grounding Grid for Ensuring the Safety of Personnel and Equipment. *Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 71-80. doi: <https://doi.org/10.26855/jepes.2021.08.001>.
- Pereira Sodre R., Lopes Pereira B., Leite Sidrim L., Almeida J.F., Souza Sobrinho C.L.S. Optimization of Grounding Grids Design for a Square-Shaped Mesh. *IEEE Latin America Transactions*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 135-139. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8291465>.
- Cardoso C., Rocha L., Leiria A., Teixeira P. Validation of an integrated methodology for design of grounding systems through field measurements. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017, vol. 2017, no. 1, pp. 897-901. doi: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0452>.
- IEEE Std 80-2013 *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, IEEE, 2013. 226 p. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7109078>.
- IEEE Std 81-2012 *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York, IEEE, 2012. 74 p. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392181>.
- Permal N., Osman M., Ariffin A.M., Abidin Ab Kadir M.Z. Effect of Non-Homogeneous Soil Characteristics on Substation Grounding-Grid Performances: A Review. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 16, art. no. 7468. doi: <https://doi.org/10.3390/app11167468>.
- Nikolovski S., Knežević G., Baus Z. Assessment of Step and Touch Voltages for Different Multilayer Soil Models of Complex Grounding Grid. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2016, vol. 6, no. 4, pp. 1441-1455. doi: <http://doi.org/10.11591/ijece.v6i4.pp1441-1455>.
- Malanda S.C., Davidson I.E., Singh E., Buraimoh E. Analysis of Soil Resistivity and its Impact on Grounding Systems Design. *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2018, pp. 324-329. doi: <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica.2018.8520960>.
- Dilushani P.D.R., Nawodani W.R.N., Bambaravanage T., Udayakumar K.A.C. Soil Resistivity Analysis and Earth Electrode Resistance Determination. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 26-35. doi: <https://doi.org/10.9790/1676-1502012635>.
- Alotto P., Torchio R., Andolfato R., Cuccarollo D. Identification of Multilayer Soil Models for Grounding Systems from Surface Measurements. *Technical Report*, 2018. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35135.15526>.
- Rules for installing electrical installations. Kyiv, Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, 2017. 760 p. (Ukr).
- Koliushko D.G., Rudenko S.S., Istomin O.Ye., Saliba A.N. Simulation of electromagnetic processes in the grounding system with a short circuit in the operating high-voltage substation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 4, pp. 75-80. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.4.11>.

Надійшла (Received) 25.09.2024

Прийнята (Accepted) 16.01.2025

Опублікована (Published) 02.07.2025

Коліушко Денис Георгійович¹, к.т.н., с.н.с.,
Руденко Сергій Сергійович¹, к.т.н., ст. дослідник,
Вевенко Віталій Олександрович¹, аспірант,
¹ Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
e-mail: serhij_rudenko@ukr.net (Corresponding Author)

D.G. Koliushko¹, PhD, Senior Researcher,
S.S. Rudenko¹, PhD, Senior Researcher,
V.O. Vevenko¹, Postgraduate Student,
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, Ukraine, 61002.

Application of the multilayer soil equivalence method in determining the normalized parameters of the grounding system.

Introduction. Normalized parameters of the grounding system, such as touch voltage and resistance, are critically important for ensuring electrical safety and reliability of power plants and substations. The complexity of the multi-layered soil structure makes it difficult to determine mentioned parameters. This is due to the fact that real soils on the territory of energy facilities of Ukraine have three or more layers, and the specified parameters are determined by software with two-layer calculation models. Therefore, the need to provide multilayer geoelectric structures into equivalence two-layer models for practical application is an urgent task. **Goal.** Determination of the application limits of the multilayer soils equivalence method based on the calculating results analysis of the grounding system normalized parameters. **Methodology.** The study considered a three-layer model for four soil types (A, H, Q, K) common in Ukraine. The calculations were performed using the LiGro software package, which is based on the method of integro-differential equations, applied to the analytical solution of the problem of the electric field potential of a point current source in a three-layer conducting half-space. As a criterion for the possibility of applying the equivalence method, a relative error value of 10 % was chosen when determining the normalized parameters of a grounding system of the given topology and soil type. When determining the error, the calculation results in the original three-layer soil structure for the given topology of the grounding system were taken as the true value. **The results** show that the effectiveness of equivalent technique significantly depends on the type of soil and the area of the grounding system. In particular, for soil type A, replacing the upper and middle layers with the equivalent first layer (the lower layer with the second) provides a smaller error in the calculations of the grounding resistance than representing the upper layer as the first, and the middle and lower layers as the second equivalent layer. At the same time, there is a tendency for the error to decrease with increasing area of the object: from 225 m² to 14400 m², for the first case, the error decreased from -14.6 % to -2.6 %, and for the second case, it changed from -9.3 % to 14.6 %, respectively. **Originality.** For the first time, the results of the methodical error evaluation of the equivalence techniques of multilayered soils of different types when calculating the normalized parameters of grounding system are presented. **Practical value.** Determination of the conditions and limits of the use of the equivalence method when calculating the normalized parameters of grounding system by software complexes can be used in the design of new or reconstruction of existing energy facilities of Ukraine. References 20, tables 5, figures 4.

Key words: grounding system, touch voltage, resistance of grounding, method of equivalence, multi-layered soil.

How to cite this article:

Koliushko D.G., Rudenko S.S., Vevenko V.O. Application of the multilayer soil equivalence method in determining the normalized parameters of the grounding system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 4, pp. 80-85. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.10>