

УДК 621.316.99

doi:10.20998/2413-4295.2022.03.14

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ РОЗТІКАННЯ СТРУМУ ЗІ СТУПНІВ ЛЮДИНИ

Д. Г. КОЛУШКО, С. С. РУДЕНКО*, Ю. О. ФУРАЄВ

Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: nio5_molniya@ukr.net

АНОТАЦІЯ Для зменшення напруги дотику на електричних станціях та підстанціях використовують прокладання поверхневого шару з питомим опором більшим за вихідний ґрунт. Визначення опору розтікання струму зі ступнів людини (опору основи такого шару) є важливою характеристикою, яку необхідно враховувати як при проектуванні заземлювального пристрою, так і у процесі експлуатації. Незважаючи на практичне вимірювання вказаної величини спеціалістами НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», питання визначення опору основи залишається невисвітленим у наукових та науково-практичних виданнях України. Тому однією з цілей авторів є звернути увагу та підняти диспут стосовно способів визначення вказаного параметру. Першим кроком на шляху до цього став огляд та аналіз існуючих методів визначення. Проаналізовано експериментальні та розрахункові способи визначення опору розтікання струму зі ступнів людини та зроблені рекомендації щодо їх застосування. Аналіз усіх відомих способів визначення опору основи дозволив звести низку способів в групи розрахункових та експериментальних методів (загальна кількість проаналізованих методик – 21). За результатами аналізу низки літературних джерел та практичного досвіду контролю стану заземлювальних пристроїв визначено переваги та недоліки кожного зі способів. Надані рекомендації щодо їх використання залежно від стану об'єкту (діючий чи проектований), погодних умов, наявності додаткових локальних включень чи площадок обслуговування. Практичне значення роботи полягає в можливості оптимально обрати спосіб визначення опору основи під час контролю стану заземлювального пристрою. Аналіз визначає межі використання конкретних інженерних методик та корисний для використання проектувальникам та висококваліфікованим фахівцям, які виконують роботи з діагностики заземлювальних пристроїв діючих енергооб'єктів.

Ключові слова: заземлювальний пристрій; напруга дотику; опір ступнів людини; опір основи; питомий опір

ANALYSIS OF METHODS DETERMINATION GROUND RESISTANCE OF HUMAN FEET

D. KOLIUSHKO, S. RUDENKO, Y. FURAIIEV

Research and Design Institute "Molniya" of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT To reduce the touch voltage at power plants and substations use the laying of a surface layer with a resistivity greater than the original soil. Determining the ground resistance of human foot (resistance of the surface of such a layer) is an important characteristic that must be taken into account both when designing a grounding device and during operation. Despite the practical measurement of the specified value by the specialists of Institute "Molniya" of the NTU "KhPI", the issue of determining the resistance of the base is not covered in scientific and scientific-practical publications of Ukraine. Therefore, one of the goals of the authors is to draw attention and raise a dispute regarding the methods for determining this parameter. The first step towards this was the review and analysis of existing methods of determination. The experimental and computational methods for determining the ground resistance of human feet and recommendations for their use were analyzed. The analysis of all known methods for determining the resistance of base made it possible to group ones into groups of calculation and experimental methods (the total number of analyzed methods is 21). Based on the results of the analysis of a number of literature sources and practical experience of monitoring the condition of grounding system, the advantages and disadvantages of each method are determined. Recommendations for their use depending on the condition of the object (current or designed), weather conditions, the presence of additional local inclusions or service areas. The practical significance of the work is the ability to optimally choose the method of determining the resistance of the surface during the control of the state of the grounding device. The analysis determines the limits of the use of specific engineering techniques and is useful for designers and highly qualified specialists who perform work on diagnosing grounding devices of existing power facilities.

Keywords: grounding system; touch voltage; ground resistance of human feet; base resistance of surface; resistivity

Вступ

Виконання робіт на діючих електричних станціях і підстанціях відносяться до робіт підвищеної небезпеки. У разі виникнення аварійної ситуації внаслідок короткого замикання, удару блискавки чи електричної дуги при комутації головним вражаючим фактором є напруга дотику.

Для електричної безпеки обслуговуючого персоналу та сторонніх осіб на території енергетичних об'єктів облаштовується складна система заземлення, до якої кожна

одиниця обладнання приєднується окремим провідником. Заземлювальний пристрій (ЗП) має забезпечувати припустимі значення напруги дотику у будь-яку пору року та при будь-якій погоді.

На теперішній час основним способом визначення напруги дотику є розрахунковий [1]. Незалежно від методу та умов розрахунку (аналітичний чи чисельний, дво- чи тришарова модель ґрунту) на значення напруги дотику, крім розподілу потенціалів під час протікання

аварійних струмів впливають опори тіла та розтікання струму зі ступнів людини, а також опір контактних з'єднань обладнання з ЗП (див. рис. 1).

На рис. 1: ϕ_e – потенціал на обладнанні, що опинилося під напругою, ϕ_p – потенціал на поверхні землі в точці спостереження P, на відстані 0,8 м (чи 1,0 м) від обладнання під напругою, R_b – опір тіла людини 1000 Ом [2]; R_f – опір розтікання струму зі ступнів людини (опір основи), R_c – опір контактного з'єднання обладнання з ЗП. Величина R_c , як мінімум, на три порядки менша за R_f та R_b , тому можемо його не враховувати. Таким чином, вираз для визначення напруги дотику приймає загальновідомий вигляд:

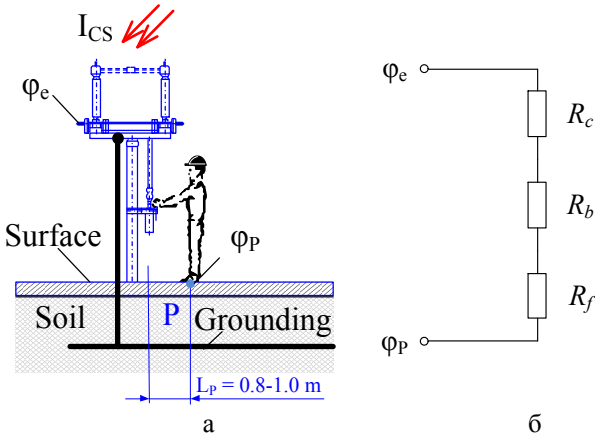


Рис. 1 – Фізична схема виникнення напруги дотику (а) та еквівалентна електрична схема заміщення (б)

$$U_t = |\phi_e - \phi_p| \frac{R_b}{R_b + R_f} \quad (1)$$

Якщо опір тіла людини R_b , приймається сталим згідно нормативних документів, то R_f – величина змінна і її коректне визначення є актуальною задачею. На рис. 2 наведено графік, який підтверджує значний вплив опору основи на поточне значення напруги дотику U_t . [3], де U_{t0} – початкове значення напруги дотику при опорі $R_f = 100$ Ом.

Питанню визначення опору R_f присвячена низка наукових робіт [4-12], а також деякі розділи міжнародних та національних стандартів [13-18]. Різноманіття способів потребує ретельного розгляду для вибору найбільш дієвих у практиці діагностики та проектування ЗП об'єктів електроенергетики.

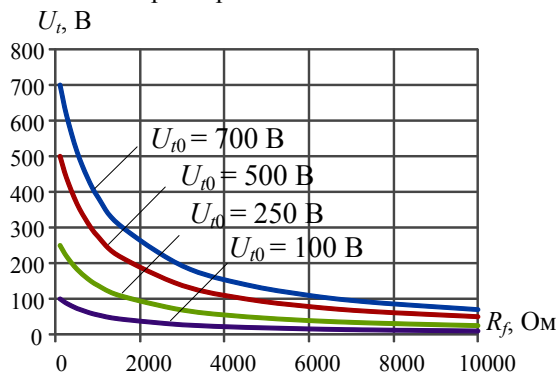


Рис. 2 – Залежність U_t від величини R_f

Мета роботи

Аналіз експериментальних та розрахункових способів визначення опору розтікання струму зі ступнів людини та рекомендацій щодо їх застосування.

Експериментальні способи вимірювання

1. За методиками стандарту IEEE

Експериментальний спосіб вимірювання, описаний в стандарті IEEE [16], відноситься до лабораторних способів. Він базується на тому, що у спеціальний вимірювальний бокс, заздалегідь підготовлений, поміщається зразок ізолюючого шару вагою 25 кг (див. рис. 3).

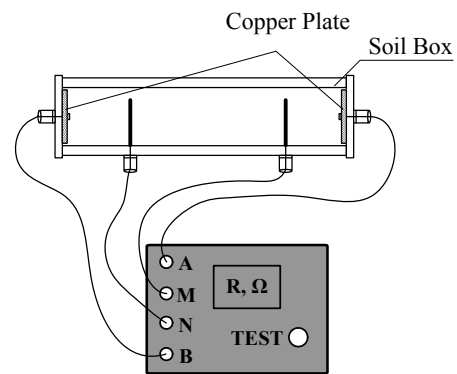


Рис. 3 – Узагальнена вимірювальна схема [16]

За результатами вимірювання розраховується питомий опір ізолюючого шару згідно (2), який далі використовується для оцінки опору поверхневого шару за додатковими формулами.

$$\rho_s = R \times A/L \quad (2)$$

де ρ_s – питомий опір поверхневого шару; R – вимірний опір досліджуваного зразку; A – площа зразку; L – товщина (глибина) зразку.

Опір визначається для «чистого сухого» та «мороженого» зразка. У низці робіт наведено результати вимірювань для різних порід та фракцій [10,11,13,15] (в останній публікації використана вага приблизно 40 кг).

Представлені в стандарті схеми вимірювання в цілому схожі й не мають помітних відмінностей окрім приладів, що використовуються. При цьому, площа зразка повинна бути приблизно 4,5 м², а глибина – 1,5 м, як показано у додатку А.1 [15].

У роботі [12] наведено дещо інший спосіб експериментального визначення опору основи (див. рис. 4). Він полягає у використанні вимірювальної комірки, яка виконана зі скловолокна довжиною 900 мм, шириною 600 мм і глибиною 150 мм з мідними електродами, що покривають дві протилежні стінки, як і в схемі, наведеної на рис. 3. Основна відмінність полягає у

використанні алюмінієвих кульок для зменшення контактної опору між вимірювальними електродами та зразком досліджуваного матеріалу поверхні. Можемо припустити, що це дозволяє врахувати найгірші погодні умови (без алюмінієвих куль опір зразка майже у 6 разів більший).

На рис. 4 позначено: V_1 та V_2 – значення вимірної напруги на вольтметрах відповідно; R_s – опір шунтувальних резисторів; Z_{m1} та Z_{m2} – еквівалентний імпеданс вимірювального плеча вольтметрів відповідно (з урахуванням ємності).

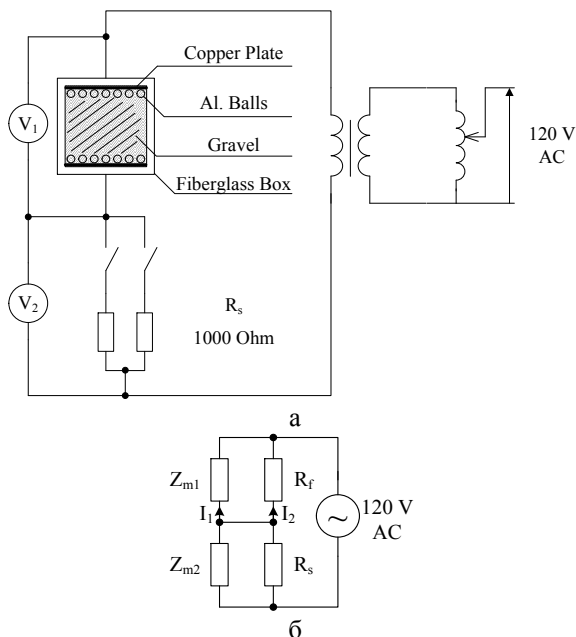


Рис. 4 – Узагальнена вимірювальна (а) та еквівалентна (б) електрична схеми [16]

Особливістю вимірювання є також використання фактично омичного подільника напруги. Слід відзначити, що для вказаного методу приведено вираз для розрахунку опору R_f .

$$R_f = \frac{V_1}{I_2} = \frac{V_1}{\left(\frac{V_2}{R_s} - \frac{V_1}{Z_{m1}} \right)} \quad (3)$$

Перевагами вказаних методів є використання їх при проектуванні нових енергооб'єктів, з можливістю виконати вимірювання для конкретного типу поверхневого шару ґрунту, з урахуванням реального впливу вологості, солей на значення опору.

Можна також виокремити наступні недоліки:

- лабораторний підхід, тобто вимірювання виконуються виключно в лабораторних умовах, а не на енергооб'єкті, з доставкою досліджуваного матеріалу;
- непряме визначення опору основи (потребує розрахунку на основі результатів вимірювання);
- значна вага досліджуваного матеріалу для якісної оцінки (25–40 кг);
- оцінка носить узагальнений вигляд, а не локальний для кожного місця, що може суттєво

збільшити похибку при визначенні напруги дотику безпосередньо на об'єкті;

- метод можна застосовувати лише для сипучих матеріалів (щебінь, гравій, пісок тощо).

Крім того, використання отриманих результатів за вказаними методами для оцінки напруги дотику на реальних об'єктах, де існують домішки з провідного матеріалу (металургійні, вугільні, хімічні підприємства й тп.) викликає значні сумніви.

2. Спосіб вимірювання НДПКІ «Молнія»

У випадку вимірювання опору основи виконується безпосередньо на енергетичному об'єкті в процесі експериментального визначення електричних характеристик для розрахунку напруги дотику в рамках електромагнітної діагностики ЗП[19].

Визначення R_f проводиться на відстані 0,8 м (або 1 м залежно від вимог стандарту) від місця обслуговування або заземлювального провідника і базується на методі амперметра-вольтметра. Опір вимірюється між заземлювальним провідником та потенційним електродом, що імітує дві ступні людині (див. рис. 5).

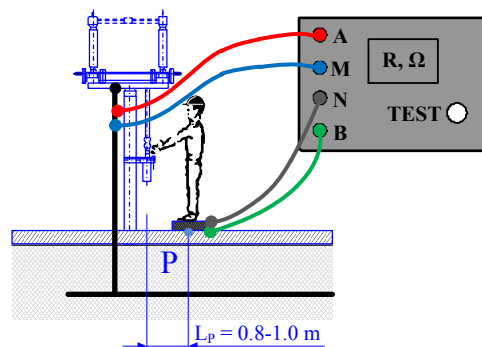


Рис.5 – Вимірювання опору R_f за методом НДПКІ «Молнія»

Електрод представляє собою пластину із контактною поверхнею 25x25 см². Особливістю його конструкції полягає у використанні електропровідної гуми або просто мідної пластини для забезпечення надійного контакту поверхні електрода із землею. Для імітації найгірших погодних умов та покращення контакту електрода з поверхнею, ґрунт попередньо поливають водою (зволожують). Для створення достатнього тиску електрода на землю на нього або стає один із членів вимірювальної бригади (для електробезпеки людини служить шар з електроізоляційного матеріалу), або встановлюється вантаж масою 25–35 кг. Потенційний електрод містить також шунтуючий резистор з опором тіла людини ($R_b=1000$ Ом). Перевагами такого методу є:

- простота виміру;
- можливість визначення опору основи як для кожної одиниці обладнання окремо, так і усередненого значення для всієї території підстанції;
- завдяки проведенню вимірів безпосередньо

на об'єкті враховуються всі особливості (локальна неоднорідність ґрунту, наявність у деяких місцях підстиляючого шару, каналів тощо).

Недоліки методу:

– некоректні результати вимірювання при від'ємній температурі (значення буде значно завищене у порівнянні з опором при температурі вище 0 °С);

– неможливість застосування методу при проектуванні об'єкту.

Розрахункові способи

1. Розрахунок опору ступнів для площадок обслуговування

Для випадку облаштування спеціальних площадок обслуговування (які, як правило мають форму паралелепіпедів) опір розтікання струму зі ступнів людини можна обчислити як опір провідника

$$R_f = \rho_s \frac{h_s}{S_s} \quad (4)$$

де ρ_s – питомий опір матеріалу підсипки, h_s – товщина підсипки, S_s – площа місця обслуговування.

Для розрахунку як правило, використовують відомості про ρ_s з довідників, проте може бути використане й значення отримане за схемою на рис. 4 для відповідного типу підсипки з конкретної електричної станції чи підстанції. У табл. 1 наведено значення питомого опору для найпоширеніших матеріалів поверхневого шару з [6,16,18].

Таблиця 1 – Типовий питомий опір матеріалу поверхні

Опис матеріалу поверхні	Питомий опір зразка, Ом·м	
	сухий стан	вологий стан
Дроблений граніт	140×10 ⁶	1300
Граніт, 4 см	4000	1200
Граніт, 2–2.5 см	–	6513
Граніт, 2.5–5.0 см	(1.5 – 4.5)×10 ⁶	5000
Митий граніт, 5–10 см	(2.6 – 3.0)×10 ⁶	10 000
Митий граніт, 2 см	2×10 ⁶	10 000
Асфальт	(2 – 30)×10 ⁶	(1– 600)×10 ⁴
Бетон	(1– 1000)×10 ⁶	21–100
Кварц	15 000	300–800
Жорства	5 500	250–750
Щебінь	5 000	3 000
Пісок	1 000 – 4 000	10–500
Суглинок	100	10–60

2. Розрахунок опору ступнів для всієї території

У випадку коли на території підстанції відсутні спеціально обладнані площадки, або необхідно розрахувати опір в середньому для всієї території використовується вираз для визначення опору пластини, що імітує ступні людини.

Згідно [5] для круглої металевої пластини радіусом

r_0 опір буде складати:

$$R_f = \frac{\rho_1}{4r_0} \quad (5)$$

де ρ_1 – питомий опір верхнього шару ґрунту або ізолюючого шару.

Як правило, для розрахунку використовується експериментальне значення ρ_1 , визначене за результатами вертикального електричного зондування на території відкритого розподільчого пристрою. Але може бути використане й значення отримане за схемою рис. 4.

Вираз (5) описує опір за умови однорідного ґрунту. Якщо ж наявний поверхневий шар, то значення необхідно помножити на коефіцієнт зниження показників поверхневого шару (C_s) [5–9], який є функцією товщини поверхневого шару та коефіцієнта відбиття між питомим опором поверхневого шару та питомим опором ґрунту, що визначається як $K=(\rho_1 - \rho_s)/(\rho_1 + \rho_s)$.

Визначення коефіцієнту C_s отримало найбільше розповсюдження серед дослідників та міжнародних стандартів як спосіб визначення опору R_f . Базовий вираз отримано шляхом моделювання сфери радіусом 0,106 м, що імітує ступні людини, за допомогою методу зображень для двошарового напівпростору. Проте розрахунок C_s носить достатньо складний характер і як правило використовуються різні напівемпіричні формули для діапазонів товщин ізолюючого шару. Найдетальніше такі вирази розглянуто в дослідженнях [4,5], де проведено порівняння дванадцяти формул для визначення R_f чи C_s .

За висновками роботи [4] найбільш точними виразами для розрахунку є три, з рекомендацією застосування (6), як найбільш простого, з похибкою, що не перевищує інженерної. У порівнянні з теоретичним ідеалізованим випадком вона становить до 8,3 %.

$$C_s = \frac{1}{0,96} \left[1 - \frac{a \cdot (1 - \rho_1 / \rho_s)}{2h_s + r_0} \right], \quad (5)$$

де r_0 – напівсфера з радіусом 0,106 м.

Загальними перевагами всіх розрахункових способів є наступне:

– можливість використання як при проектуванні, так і при контролі існуючого ЗП для оцінки опору розтікання ступнів;

– незалежність від пори року та погодних умов при виконанні діагностики ЗП.

Недоліки наведених розрахункових методів:

– емпірична залежність від товщини шару, яка носить достатньо умовний розподіл;

– вихідні дані для розрахунку це, як правило, узагальнені відомості про питомий опір без прив'язки до конкретного енергетичного об'єкту, що знижує точність та адекватність моделі реальним

умовам;

– неуніверсальність, тобто різні способи розрахунку для площадки обслуговування з плит (4) та для території (5).

Висновки

Проведений аналіз методів визначення опору ступнів показав, що існують більше десяти способів розрахунку та декілька способів експериментального визначення.

Вимірювання за способом НДПКІ «Молнія» є найпростішими та таким де найбільш повно враховано локальні особливості ґрунту на території діючого відкритого розподільчого пристрою. Головним недоліком є некоректність результатів вимірювань при від'ємній температурі.

Аналіз переваг та недоліків розглянутих методів визначення опору ступнів дозволяє розробити практичні рекомендації щодо їх використання, а саме:

– при проектуванні нового енергетичного об'єкту слід використовувати експериментальну методику вимірювання питомого опору ізолюючого шару та розрахунковий спосіб;

– при контролі стану заземлювального пристрою діючого энергооб'єкту слід використовувати методику НДПКІ «Молнія» причому у разі виконання діагностики при від'ємній температурі слід перевірити отриманні результати вимірювання опору ступнів за допомогою розрахункових методів.

Список літератури

1. Коліушко Д. Г., Руденко С. С. Аналіз методів контролю стану заземлювальних пристроїв діючих энергооб'єктів на сучасному етапі. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2019. №1. С. 69–74. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.11.
2. Wu X., Simha V., Xue Y. X., Wellman R. Substation grounding studies with more accurate fault analysis and simulation strategies. *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2017. P. 1–9. doi: 10.1109/PESGM.2017.8274557.
3. Коліушко Д. Г., Руденко С. С. Фактори впливу на напругу дотику з огляду розробки рекомендацій для реконструкції заземлювального пристрою. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 3. С. 29–36. doi: 10.15407/techned2019.03.29.
4. Paunovic I., Nahman J. Surface Layer Derating Factor Cs for Determining Touch - and Step – Voltages. *Submitted to IEEE TPWDR, TPWRD-00922-2017*, 2017. P. 1–4. doi: 10.13140/RG.2.2.18303.92325.
5. 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. P. 2180–2184. doi: 10.1109/TPWRD.2007.905284.
6. Mohammad Ali Adelian. Improvement of Substation Earthing. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2014. Vol. 3. Is. 4. P. 100–104.
7. Abdel-Salam M., Ahmed A., Nayel M., Zidan A. Surface Potential and Resistance of Grounding Grid Systems in Homogeneous Soil. *Electric Power Components and Systems*. 2007. Vol. 35:10. P. 1093–1109. doi: 10.1080/15325000701297109.
8. Lorentzou M., Georgantzis G., Hatzigaryriou N. Design and analysis factors influencing power system grounding. *Power Conference (Med Power)*. 2004. P. 1–9. doi: 10.13140/RG.2.1.2312.2403.
9. Ma J., Dawalibi F. P., Southey R. D. Effects of the changes in

IEEE std. 80 on the design and analysis of power system grounding. *Proceedings. International Conference on Power System Technology*. 2002. Vol. 2. P. 974–979. doi: 10.1109/ICPST.2002.1047544.

10. Carmen W. D., Woodhouse D. J. Performance evaluation of series impedance insulation used as earthing system safety mitigation measures. *IEEE Powercon*. 2000. P. 1353–1358 doi: 10.1109/ICPST.2000.898166.
11. Abledu K. O., Laird D. N. Measurement of substation rock resistivity. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1992. Vol. 7. No. 1. P. 295–300. doi: 10.1109/61.108921.
12. Patel S. G. Seasonal Variations of Grounding Parameters by Field Tests. Principal Investigator *EPRI TR-100863*. 1992. Project 1494-08. URL: <https://www.osti.gov/biblio/7178516> (дата звернення: 03.08.2022).
13. ASTM D448-2008, Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction. *American Society for Testing and Materials*. 2008. 3 p.
14. ASTM C136-2006, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *American Society for Testing and Materials*. 2006. 6 p.
15. ASTM G57-2012, Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. *American Society for Testing and Materials*. 2012. 6 p.
16. IEEE Standard 81-2012. IEEE Guide for measuring Earth resistivity, ground impedance, and Earth surface potentials of a grounding system. [Amended by 2012-12-28]. New York: IEEE. 2012. 86 p. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6392181.
17. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009. Київ: Мінпаливенерго України. 2010. 54 с.
18. ABNT NBR 15751:2009. Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos [Substation earthing systems – Requirements]. ABNT. 2009. 47 p.
19. Коліушко 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: 10.20998/2074-272X.2018.1.11.

References (transliterated)

1. 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: 10.20998/2074-272X.2019.1.11.
2. Wu X., Simha V., Xue Y. X., Wellman R. Substation grounding studies with more accurate fault analysis and simulation strategies. *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2017, pp. 1–9, doi: 10.1109/PESGM.2017.8274557.
3. 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: 10.15407/techned2019.03.29.
4. Paunovic I., Nahman J. Surface Layer Derating Factor Cs for Determining Touch - and Step – Voltages. *Submitted to IEEE TPWDR, TPWRD-00922-2017*, 2017, pp. 1–4, doi: 10.13140/RG.2.2.18303.92325.

5. 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: 10.1109/TPWRD.2007.905284.
6. Mohammad Ali Adelian. Improvement of Substation Earthing. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2014, Vol. 3, Iss. 4, pp. 100–104.
7. Abdel-Salam M., Ahmed A., Nayel M., Zidan A. Surface Potential and Resistance of Grounding Grid Systems in Homogeneous Soil. *Electric Power Components and Systems*, 2007, Vol. 35:10, pp. 1093–1109, doi: 10.1080/15325000701297109.
8. Lorentzou M., Georgantzis G., Hatzigryriou N. Design and analysis factors influencing power system grounding. *Power Conference (Med Power)*, 2004, pp. 1–9, doi: 10.13140/RG.2.1.2312.2403.
9. Ma J., Dawalibi F. P., Southey R. D. Effects of the changes in IEEE std. 80 on the design and analysis of power system grounding. *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, 2002, Vol. 2, pp. 974–979, doi: 10.1109/ICPST.2002.1047544.
10. Carmen W. D., Woodhouse D. J. Performance evaluation of series impedance insulation used as earthing system safety mitigation measures. *IEEE Powercon*, 2000, pp. 1353–1358, doi: 10.1109/ICPST.2000.898166.
11. Abledu K. O., Laird D. N. Measurement of substation rock resistivity. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1992, Vol. 7, no. 1, pp. 295–300, doi: 10.1109/61.108921.
12. Patel S. G. Seasonal Variations of Grounding Parameters by Field Tests. Principal Investigator *EPRI TR-100863*, 1992, Project 1494-08. Available at: <https://www.osti.gov/biblio/7178516> (accessed 03.08.2022).
13. ASTM D448-2008, Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction. *American Society for Testing and Materials*, 2008, 3 p.
14. ASTM C136-2006, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *American Society for Testing and Materials*, 2006, 6 p.
15. ASTM G57-2012, Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. *American Society for Testing and Materials*, 2012, 6 p.
16. IEEE Standard 81-2012. *IEEE Guide for measuring Earth resistivity, ground impedance, and Earth surface potentials of a grounding system*. [Amended by 2012-12-28]. New York: IEEE, 2012, 86 p., doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6392181.
17. *Viprobuvannya ta kontrol' pristroiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instrukciya* [Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction]. SOU 31.2-21677681-19:2009. Kyiv, Minenergovugillya Ukrainy Publ., 2010, 54 p.
18. ABNT NBR 15751:2009. Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos [Substation earthing systems – Requirements]. ABNT, 2009, 47 p.
19. 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. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp. 66–70. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.11.

Відомості про авторів (About authors)

Коліушко Денис Георгійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Молнія», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3112-4260; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Denis Koliushko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher, Senior researcher of the Department of Automated electromechanics systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3112-4260; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Руденко Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Молнія», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2544-1545; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Serhii Rudenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2544-1545, e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Фураєв Юрій Олександрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Молнія», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1643-4666; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Yurii Furaev – junior researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1643-4666, e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Коліушко Д. Г., Руденко С. С., Фураєв Ю. О. Аналіз методів визначення опору розтікання струму зі ступнів людини. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 3 (13). С. 93–98. doi:10.20998/2413-4295.2022.03.14.

Please cite this article as:

Koliushko D., Rudenko S., Furaev Y. Analysis of methods determination ground resistance of human feet. *Bulletin of the National Technical University KhPI. Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 3(13), pp. 93–98, doi:10.20998/2413-4295.2022.03.14.

Надійшла (received) 07.08.2022