

Д.Г. Коліушко, С.С. Руденко, Л.В. Асмолова, Т.І. Ткачова

## ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ ЗОНДУВАННЯ ҐРУНТУ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ОПОРУ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ПІДСТАНЦІЙ 35 КВ

*Метою роботи є підвищення точності визначення опору заземлювального пристрою електроустановок напругою понад 1 кВ, що працюють в мережі з ізольованою нейтраллю. Для цього було проаналізовано величину необхідної глибини зондування ґрунту у процесі виконання електромагнітної діагностики стану заземлювального пристрою. Були проведені чисельні експерименти, які полягали у розрахунку електричних параметрів заземлювача, виконаного у вигляді прямокутника розмірами  $a \times b$  з діагоналлю  $D$  і розташованого на глибині 0,3 м у двошаровому ґрунті. Було розглянуто різні варіанти співвідношення питомих електричних опорів ґрунту та розмірів заземлювального пристрою. Врахування статистичного розподілу вказаних параметрів для понад 500 підстанцій України класом напруги 35 кВ дозволило встановити двофакторну ймовірнісну залежність мінімально необхідної глибини зондування ґрунту установкою Веннера. Бібл. 9, рис. 4.*

*Ключові слова:* заземлювальний пристрій, опір заземлювального пристрою, зондування ґрунту, установка Веннера електромагнітна діагностика.

*Целью работы является повышение точности определения сопротивления заземляющего устройства электроустановок напряжением выше 1 кВ, работающих в сети с изолированной нейтралью. Для этого была проанализирована величина необходимой глубины зондирования грунта в процессе выполнения электромагнитной диагностики состояния заземляющего устройства. Были проведены расчетные эксперименты, которые заключались в нахождении электрических параметров заземления, выполненного в виде прямоугольника размерами  $a \times b$  с диагональю  $D$  и расположенного на глубине 0,3 м в двухслойном грунте. При этом были рассмотрены различные варианты соотношения удельных электрических сопротивлений грунта и размеров заземляющего устройства. Учет статистического распределения указанных параметров для более 500 подстанций Украины классом напряжения 35 кВ, позволил установить двухфакторную вероятностную зависимость минимально необходимой глубины зондирования грунта установкой Веннера. Библ. 9, рис. 4.*

*Ключевые слова:* заземляющее устройство, сопротивление заземляющего устройства, зондирование грунта, установка Веннера, электромагнитная диагностика.

**Постановка проблеми.** Для забезпечення надійної та безпечної роботи енергетичних об'єктів при короткому замиканні [1] або прямому ударі блискавки [2] використовується заземлювальний пристрій, виконаний у відповідності до нормативних вимог. Для електроустановок напругою понад 1 кВ, що працюють у мережі з ізольованою нейтраллю (підстанції класом напруги 35 кВ та нижче), єдиним електричним параметром, який дозволяє оцінити стан заземлювального пристрою (ЗП), є його опір ( $R_{EA}$ ) [1]. Відповідно до [3] значення  $R_{EA}$  має періодично контролюватися й визначатися не рідше ніж раз на 12 років. Вимірювання опору ЗП, як правило, виконується за методом амперметру-вольтметру з використанням однопроменевої або двопробевої схеми. При цьому, необхідно встановлювати вимірювальні електроди в зоні нульового потенціалу, відстань до якої, як правило, у декілька разів перевищує найбільший розмір ЗП [4].

Для підстанцій класом напруги 35 кВ, які розташовані в умовах щільної міської чи промислової забудови при розгалуженій комунікаційній системі, це є практично неможливим. Тому єдиним способом визначення опору ЗП таких енергооб'єктів є розрахунковий з використанням спеціальних програмних комплексів. Отже, підвищення точності розрахунку  $R_{EA}$  є актуальною задачею з точки зору електробезпеки та надійності роботи електроустановок напругою понад 1 кВ з ізольованою нейтраллю.

Вихідними даними для розрахунку опору ЗП є реальна схема конструктивного виконання з зазначенням глибини розташування елементів ЗП, поперечний переріз заземлювачів та електрофізичні характеристики ґрунту (ЕФХ) (кількість шарів ґрунту, їх питомий електричний опір (ПЕО) та товщина) [5].

Конструктивне виконання ЗП об'єктів, які тривалий час знаходяться в експлуатації, визначається за допомогою індукційного методу при проведенні електромагнітної діагностики стану ЗП [4], поперечний переріз заземлювачів вимірюється при вибіркового розкритті ґрунту, а ЕФХ – ґрунту за результатами вертикального електричного зондування (ВЕЗ) поблизу підстанції. Співвідношення ЕФХ ґрунту (ПЕО першого шару  $\rho_1$  та другого шару  $\rho_2$ , а також товщини першого шару  $h_1$ ) й геометричні розміри ЗП фактично визначають необхідну глибину зондування та технічні параметри приладу для проведення ВЕЗ [6]. Авторами в період з 1999 р. по 2019 р. була проведена електромагнітна діагностика стану ЗП понад 500 підстанцій класом напруги 35 кВ, які розташовані в усіх областях України, тому накоплені статистичні дані дозволяють визначити характерні розміри ЗП підстанцій та межі значень ЕФХ ґрунту.

Як показує аналіз літератури, проведений в [7], чітка залежність між розміром ЗП та необхідною глибиною зондування відсутня. Глибина зондування ( $H_{VES}$ ) визначена Кострубою С.І. ще в 1983 р., як залежність довжини рознесення струмових електродів від квадратного кореня площі ЗП, лише для установки Бургсдорфа, проте не приведена подібна або будь-яка інша залежність для інших установок ВЕЗ (зокрема, для найбільш поширеної установок Веннера) [6].

В [6, 8, 9] наведено деякі дані з дослідження необхідної глибини зондування, отримані при вивченні залежності величини опору ЗП від його площі. З аналізу вказаних робіт слідує висновок: якщо зі збільшенням глибини величина ПЕО падає, то необхідно визначати структуру ґрунту на глибину мінімум

$1,5 \cdot \sqrt{S}$ , а при зростанні – декілька  $(3-5) \cdot \sqrt{S}$ . Таким чином, в роботах, присвячених проведенню ВЕЗ в цілях проектування або діагностики ЗП, відсутня однозначна залежність необхідної глибини зондування від розмірів ЗП та ЕФХ ґрунту.

**Метою роботи** є визначення мінімально необхідної глибини зондування ґрунту для проведення розрахунку опору ЗП підстанцій класом напруги 35 кВ.

**Матеріали дослідження.** Розмір ЗП, як вказувалося раніше, визначає необхідну глибину зондування  $H_{VES}$  при проведенні діагностики стану ЗП, тому пропонується знайти її у вигляді добутку найбільшого геометричного розміру ЗП (діагоналі)  $D$  та коефіцієнту зондування  $K_{VES}$ :

$$H_{VES} = K_{VES} D. \quad (1)$$

Таким чином, задача фактично зводиться до визначення коефіцієнту  $K_{VES}$ , який залежить від відповідного розміру діагоналі ЗП та ЕФХ ґрунту.

Для вирішення поставленої задачі необхідно проаналізувати вплив кожного з факторів в межах їх значень. Для визначення впливу розміру ЗП скористаємося статистичними даними, отриманими при проведенні діагностики стану ЗП підстанцій класом напруги 35 кВ та представленими у вигляді густини ймовірності максимального розміру  $D$  [5].

З аналізу рис. 1 випливає, що значення найбільшої діагоналі лежить в межах від 10 м до 300 м з урахуванням підстанцій, на яких дослідження не проводилося.

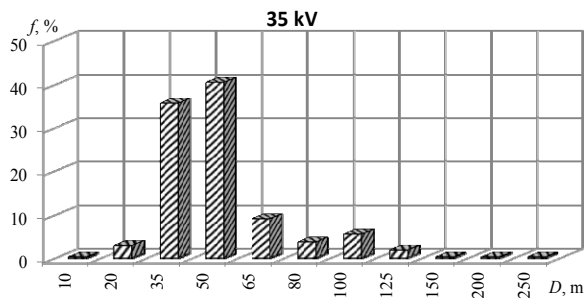


Рис. 1. Густина ймовірності розміру  $D$  ЗП

Також було систематизовано різні співвідношення ПЕО ґрунту  $\rho^* = \rho_2/\rho_1$ : на рис. 2 наведена густина ймовірності значення відносного ПЕО  $\rho^*$ , яка була визначена за результатами проведення ВЕЗ в рамках електромагнітної діагностики ЗП досліджуваних підстанцій в усіх областях України.

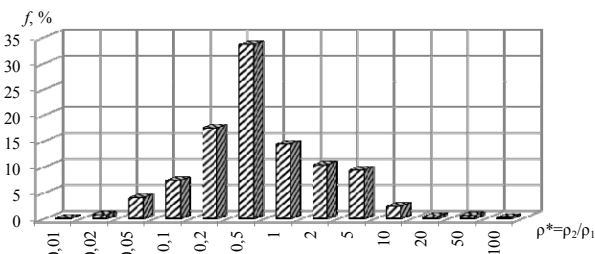


Рис. 2. Густина ймовірності відносного ПЕО

Відповідно до отриманих результатів доцільним є розглянути  $\rho^*$  в діапазоні  $[0,05; 10]$ , що дозволяє охопити 99 % ґрунтів України в місцях розташування діючих підстанцій.

Для визначення  $H_{VES}$  проведено чисельні експерименти, які полягали у розрахунку опору ЗП ( $R_{EA}$ ),

виконаного у вигляді квадрата розмірами  $a \times a$  з діагоналлю  $D$  і розташованого на глибині 0,3 м у двошаровому ґрунті. Внутрішні комірки у ЗП відсутні, оскільки їх вплив на  $R_{EA}$  є незначним та не перевищує 10 % [6]. Необхідна глибина зондування визначалася за відносним опором ЗП на основі дослідження впливу на його значення глибини розділу шарів  $h$ . Для кожного  $\rho^*$  розраховувалося значення  $R_{EA}$  при зміні співвідношення  $h/D$  в межах від 0,4 м до  $h_{max}$ , де  $h_{max}$  – значення глибини розділу шарів у двошаровому ґрунті, при якому значення опору ЗП стає рівним опору ЗП в однорідному ґрунті ( $R_{EA} = R_{EAUNI}$ ). При цьому для варіації  $\rho^*$  змінювалося значення  $\rho_1$ , а базове  $\rho_2$  становило 1000 Ом·м, що дозволяє охопити всі співвідношення  $\rho_2/\rho_1$  [5].

У ході проведених експериментів було отримано сімейство кривих, що описують вплив величини  $h$  для різних комбінацій ЕФХ ґрунту і геометричних параметрів ЗП  $R_{EA}^* = f(h/D)$ , де  $R_{EA}^* = R_{EA} / R_{EAUNI}$ . Результати розрахунків для ЗП, який виконано у вигляді квадрата зі стороною  $a = [10; 40; 100; 200]$  м та діагоналлю  $D = [14; 56,6; 141; 282]$  м відповідно, наведено на графіках рис. 3.

На графіках пунктиром позначено 10 %-ве відхилення. Як бачимо, для ЗП з діагоналлю 14 м для розрахунку з похибкою не більше 10 % необхідно зондувати ґрунт на глибину не менше  $4D$ , а для ЗП з діагоналлю 56 м –  $3D$ . Розглянувши окремі діапазони значень  $\rho^*$ , можемо констатувати, що при знаходженні  $\rho^*$  в діапазоні  $[0,05; 2]$  (що відповідає 95 % досліджених підстанцій в Україні) глибина зондування становить  $1,5 \cdot D$  для 14 м та  $1,0 \cdot D$  для 56 м. Тобто, наприклад, зменшивши ймовірність потрапляння  $\rho^*$  в діапазон  $p_{EA}$  з 0,99 до 0,95, можна суттєво зменшити (в три рази) розрахункове значення необхідної глибини зондування для однієї й тієї ж підстанції ( $D=56$  м) з  $H_{VES}=3D$  до  $H_{VES}=D$ . Це значно зменшує трудові затрати на виконання ВЕЗ при збереженні точності розрахунків.

Можливість зменшення ймовірності визначається у залежності від попередніх відомостей про структуру ґрунту у відповідній географічній місцевості (наприклад, це є недопустимим для гористої місцевості, де відомо, що опір нижніх шарів скальних порід буде на порядок більшим за опір верхніх осадових порід, тобто  $\rho^* \geq 10$ ).

У цілому залежність опору ЗП від його геометричних розмірів носить нелінійний характер й при умовному безкінечному зростанні розміру ЗП значення опору входить в «насиченість» [6, 9]. Логічною виглядає аналогія з залежністю коефіцієнта  $K_{VES}$  від діагоналі ЗП, який, у свою чергу, визначає необхідну глибину зондування. Враховуючи представлені графіки (див. рис. 3), було отримано функцію  $K_{VES}(D)$  для досліджуваних діапазонів значень з заданою ймовірністю (див. рис. 4):

- $\rho^* \in [0,05; 10]$ , що відповідає ймовірності потрапляння в діапазон  $p_{EA} = 0,99$ ;
- $\rho^* \in [0,05; 5]$ , що відповідає  $p_{EA} = 0,98$ ;
- $\rho^* \in [0,05; 2]$ , що відповідає  $p_{EA} = 0,95$ .

Отримані графіки дозволяють визначити необхідну глибину зондування в залежності від максимального розміру ЗП та ймовірності потрапляння  $\rho^*$  в діапазон згідно з виразом (1).

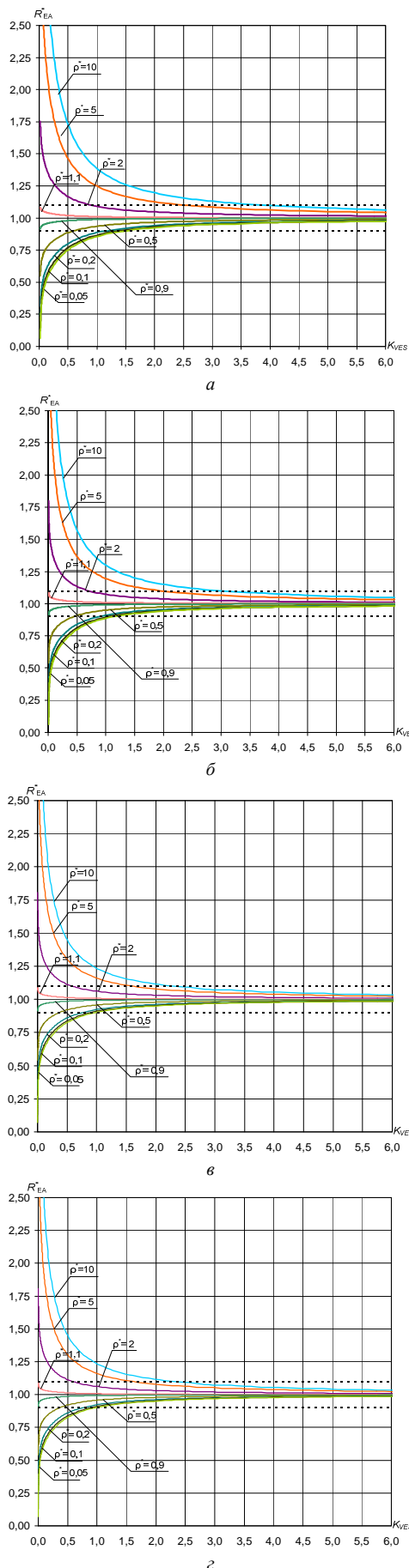


Рис. 3. Залежності відносного опору від коефіцієнту глибини зондування: а –  $a = 10$  м,  $D = 14$  м; б –  $a = 40$  м,  $D = 56,6$  м; в –  $a = 100$  м,  $D = 141$  м; г –  $a = 200$  м,  $D = 282$  м

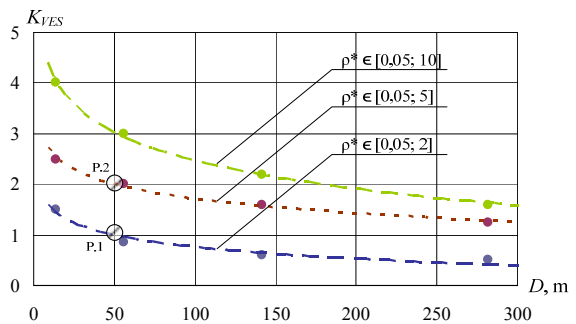


Рис. 4. Залежність коефіцієнту зондування від розміру ЗП

Крім того, аналіз отриманих даних показує, що існують такі співвідношення ґрунту та розміри ЗП, для яких необхідна глибина зондування не перевищує максимальний розмір ЗП ( $D$ ): це підстанції у яких ЗП  $D \geq 50$  м (згідно рис. 1 їх 61 %) для  $p_{EA} = 0,95$ .

Враховуючи статистичні дані (див. рис. 1 та рис. 2), ймовірність знаходження такої підстанції  $p_{LD}$  становить:

$$p_{LD} = 61 \% \cdot 0,95 / 100 \% = 0,58.$$

Враховуючи вище наведене, пропонується наступний алгоритм визначення  $H_{VES}$  при проведенні ВЕЗ в рамках виконання електромагнітної діагностики стану ЗП діючих підстанцій класом напруги 35 кВ (за умови відсутності попередніх відомостей про структуру ґрунту):

- 1) визначаємо максимальний розмір ЗП за допомогою індукційного методу (наприклад,  $D = 50$  м);
- 2) вважаємо, що ґрунт має відносне значення ПЕО в діапазоні  $\rho^* \in [0,05; 2]$  (див. Р.1 на рис. 4:  $K_{VES} = 1$ , отже  $H_{VES} = D$ );
- 3) проводиться зондування ґрунту за допомогою установки Веннера [3-5] при максимальній міжелектродній відстані рівній  $D$ ;
- 4) виконується наближена інтерпретація результатів ВЕЗ;
- 5) у залежності від отриманого значення ПЕО в п.4 можливі наступні варіанти:

- якщо  $0,05 \leq \rho^* \leq 2$ , то вважаємо, що глибина зондування достатня;
- якщо  $2 < \rho^* \leq 5$  або  $\rho^* > 5$ , то визначаємо необхідну глибину зондування за відповідною кривою рис. 5 та виразу (1), збільшимо міжелектродну відстань та проводимо додаткові вимірювання (наприклад, якщо  $\rho^* = 4,5$ , то необхідна глибина зондування збільшилась до  $2D$  – див. Р.2 на рис. 4);

- 6) за необхідності проводиться повторна інтерпретація результатів ВЕЗ та оцінюється отримане значення  $\rho^*$ .

#### Висновки.

1. На основі аналізу статистичних даних за результатами електромагнітної діагностики підстанцій класом напруги 35 кВ була встановлена ймовірнісна залежність необхідної глибини зондування від співвідношення питомих опорів ґрунту та розмірів ЗП.

2. Виявлено, що існують такі співвідношення ґрунту та розміри ЗП, для яких необхідна глибина зондування не перевищує максимальний розмір ЗП. Враховуючи статистичні дані, ймовірність знаходження таких підстанцій становить 0,58.

3. Розроблено алгоритм визначення мінімально необхідної глибини зондування в залежності від розміру діагоналі ЗП підстанції та співвідношення ПЕО шарів ґрунту.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. – Х. : «Форт», 2017. – 760 с.
2. Баранов М.И., Буряковский С.Г., Рудаков С.В. Инструментальное обеспечение в Украине натуральных испытаний объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к воздействию импульсного тока искусственной молнии // *Электротехника і електромеханіка*. – 2018. – №4. – С. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.08.
3. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с.
4. Колюшко Д.Г., Руденко С.С. Аналіз методів контролю стану заземлювальних пристроїв діючих енергооб'єктів на сучасному етапі // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2019. – №1. – С. 67-72. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.11.
5. Колюшко Д.Г., Руденко С.С., Колюшко Г.М. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 3. – С. 67-72. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.
6. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
7. Колюшко Г.М., Колюшко Д.Г., Руденко С.С. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №4. – С. 65-70. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.
8. Колечицкий Е.С., Медведев В.Т. Оценка размеров зоны растекания токов в районе заземлителей // *Энергетик*. – 2015. – №10. – С. 17-20.
9. Заземляющие устройства электроустановок (требования нормативных документов, расчет, проектирование, конструкции, сооружение): справочник / [Борисов Р.К., Горшков А.В., Жарков Ю.В. и др.]. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 360 с.

#### REFERENCES

1. *Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok* [Electrical Installation Regulations]. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).
2. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.4, pp. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.08.
3. *Natsional'nyy standart Ukrayiny. SOU 31.2-21677681-19:2009. Viprobuвання та контроль' prystroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya* [National Standard of Ukraine SOU 31.2-21677681-19:2009. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p. (Ukr).
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: 10.20998/2074-272X.2019.1.11.
5. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Koliushko G.M. Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.3, pp. 67-72. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.
6. Kostuba S.I. *Izmerenie elektricheskikh parametrov zemli i zazemlyayushchih ustrojstv* [Measurement of electrical parameters of the earth and grounding device]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 168 p. (Rus).

7. Koliushko G.M., Koliushko D.G., Rudenko S.S. On the problem of increasing computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 65-70. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.

8. Kolechitsky E.S., Medvedev V.T. Estimation of the size of the current spreading zone in the area of grounding conductors. *Energetik*, 2015, no.10, pp. 17-20. (Rus).

9. Borisov R.K., Gorshkov A.V., Zharkov Y.V. *Zazemliayushchie ustroystva elektroustanovok (trebovaniia normativnykh dokumentov, raschet, proektirovaniie, konstruktzii, sooruzhenie): spravochnik* [The grounding system of electrical installations (regulatory requirements, calculation, design, construction: Handbook)]. Moscow, Publishing House MEI, 2013. 360 p. (Rus).

Поступила (received) 16.09.2019

Колюшко Денис Георгійович<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.,

Руденко Сергій Сергійович<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.,

Асмолова Лариса Валеріївна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,

Ткачова Тетяна Іванівна<sup>2</sup>, м.н.с.,

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,

e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

<sup>2</sup> Національний науковий центр

«Харківський фізико-технічний інститут»,

61108, Харків, вул. Академічна, 1

D.G. Koliushko<sup>1</sup>, S.S. Rudenko<sup>1</sup>, L.V. Asmolova<sup>1</sup>, T.I. Tkachova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup> National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology»,

1, Akademicheskaya Str., Kharkov, 61108, Ukraine.

**Determination of the soil sounding depth for the earthing resistance calculation of substations 35 kV.**

**Purpose.** Determination of the minimum required sounding depth for calculation of the earthing resistance for substations with a voltage class of 35 kV. **Methodology.** For each ratio of electrical resistivity values of soil layers, earthing resistance was calculated with changing of the layers separation depth from 0.4 m to  $h_{\max}$ , where  $h_{\max}$  is the layers separation depth in a two-layer soil at which the earthing resistance value becomes the same as in a uniform soil. **Results.** In the experiments carried out, a family of curves was obtained that describes the effect of separation depth of soil layers for various combinations of soil electrical resistivities and geometric dimensions of the earthing arrangement. The accumulated statistical data for substations with a voltage class of 35 kV made it possible to determine the required sounding depth depending on the maximum size of the earthing arrangement and the probability of the relative resistivity falling into the corresponding range of values. An algorithm is proposed for determining the required investigation depth by Wenner method as part of the electromagnetic diagnostics of the earthing arrangement of existing substations with a voltage class of 35 kV. **Originality.** For the first time, a probabilistic relationship was established between the ratio of the electrical resistivity of soil layers, the size of the earthing arrangement, and the necessary depth investigation of the geological medium. As a result it has been proven that there are substations for which the required sounding depth does not exceed the maximum size of the earthing arrangement. **Practical value.** The use of the algorithm developed in this work allows increasing the accuracy of the earthing resistance calculation of electrical installations with voltages above 1 kV operating in a network with isolated neutral. References 9, figures 4.

**Key words:** earthing arrangement, earthing resistance, the soil sounding, Wenner installation, electromagnetic diagnostics.