

УДК 621.316.9

С. С. РУДЕНКО

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІСНУЮЧИХ ПРИЛАДІВ ЗОНДУВАННЯ ҐРУНТУ В РАМКАХ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

На основі розробленої методики та статистичної бази даних питомого електричного опору ґрунту було досліджено технічні характеристики приладів, найбільш поширених при виконанні вертикального електричного зондування в рамках контролю стану заземлювального пристрою. За допомогою довірчої ймовірності розроблено рекомендації щодо застосування певного приладу з відповідними характеристиками в залежності від класу напруги енергооб'єкту. Доведена необхідність розробки вітчизняного приладу, який дозволить проводити вертикальне електричне зондування ґрунту на території об'єктів класами напруги 35 – 750 кВ.

Ключові слова: вертикальне електричне зондування, заземлювальний пристрій, ґрунт, енергооб'єкт, технічні характеристики приладів.

На основании разработанной методики и статистической базы данных удельного электрического сопротивления грунта было исследовано технические характеристики приборов, наиболее распространенных при проведении вертикального электрического зондирования в рамках контроля состояния заземляющего устройства. С помощью доверительной вероятности разработаны рекомендации по применению определенных приборов, которые имеют соответствующие характеристики, в зависимости от класса напряжения энергообъекта. Доказана необходимость разработки отечественного прибора, который позволит проводить вертикальное электрическое зондирование грунта на территории объектов классами напряжения 35 – 750 кВ.

Ключевые слова: вертикальное электрическое зондирование, заземляющее устройство, ґрунт, энергооб'єкт, технические характеристики приборов.

Based on the developed methodology and the statistical database of the specific electrical resistance of the soil, the technical characteristics of the most commonly the measurement equipment used in vertical electrical sounding in the test of the state of the grounding grids were investigated. By means of confidence probability recommendations worked out on application of equipment with corresponding parameters, depending on the voltage class of energy object. Also it proved the necessity to develop a domestic the measurement equipment for vertical electrical sounding on the place of power plants with 35-750 kV voltage class.

Keywords: vertical electrical sounding, grounding grids, soil, energy object, technical parameters for equipment.

Постановка проблеми та аналіз публікацій

Для контролю стану та оцінки працездатності заземлювального пристрою (ЗП) діючих енергетичних об'єктів використовується електромагнітна діагностика (ЕМД) [1], яка передбачає проведення трьох етапів: експериментального, розрахункового та етапу видачі рекомендацій [2].

Однією з процедур, які виконуються на першому етапі, є вимір уявного питомого електричного опору (ПЕО) для визначення електрофізичних характеристик ґрунту (ПЕО шару, товщини шарів та їх кількості) методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ). Метою ВЕЗ є визначення параметрів геоелектричної структури шляхом інжектування генератором випробувального струму та виміру падіння напруги на відповідній ділянці поверхні ґрунту.

При цьому найбільш широке використання в рамках проведення ЕМД стану ЗП отримала чотириелектродна симетрична установка або т. з. установка Веннера, яка характеризується: високим рівнем сигналу, доброю чутливістю до горизонтальних границь поділу шарів, слабкою чутливістю до вертикальних границь поділу та профільних включень (це послаблює вплив нетипових включень, що мають локальний характер та не вчиняють значного впливу на розтікання струмів з ЗП), прямою залежністю між рознесенням електродів та глибиною зондування, більш простими виразами для розрахунку уявного ПЕО.

Прилади для проведення ВЕЗ в рамках ЕМД стану ЗП характеризуються технічними та масогабарит-

ними параметрами. Крім того, важливим є наявність автономного живлення, можливість під'єднання до ПК та вологостійкість. Основними технічними характеристиками засобів вимірювання є: клас точності, вимірювальний діапазон, поріг чутливості, припустима величина опору струмового та потенційного кола і робоча частота. Робоча частота обирається відмінно від промислової для мінімізації впливу електромагнітного поля робочих струмів електроустановки.

У світі існує низка приладів для проведення ВЕЗ це як вимірювачі опору заземлення, так і спеціалізовані георозвідувальні станції. Слід зазначити, що георозвідувальні станції (наприклад, такі як GDP-3224, «СКАЛА 48», «ОМЕГА-48» та ін.) є складними технічними комплексами, спрямованими на вирішення вузьконаправлених завдань з пошуку корисних копалин або проведення археологічних робіт, й крім того, потребують зовнішнього живлення, тому їх використання в рамках ЕМД стану ЗП є недоцільним. Найбільш поширеними приладами для виконання ВЕЗ при контролі стану ЗП стали вимірювачі опору заземлення, наприклад, такі як: Ф4103-М1 та ЦС4107 вітчизняного виробництва, MRU-101 польської фірми Sonel, С.А 6460 і С.А 6470N французької фірми Chauvin Arnoux, російський ІС-20/1 тощо. При цьому ЦС4107, MRU-101, ІС-20/1 та С.А 6460 представляють собою прилади одного класу, зокрема нижня межа вимірювань $R_{l,lim}$ у них складає 0,01 Ом, тому можна розглянути лише один з них, наприклад С.А 6460. Крім того слід відзначити універсальний комплекс для діагнос-

тики стану ЗП «КДЗ-1У» розроблений в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХП», який дозволяє проводити повний набір робіт першого етапу ЕМД стану ЗП.

Вибір того чи іншого приладу для проведення ВЕЗ ґрунту за його технічними характеристиками має базуватися на геометричних розмірах досліджуваного ЗП та значеннях уявного ПЕО, які будуть вимірюватися. В роботі [3] автором на основі статистичної бази даних ПЕО ґрунту в місцях розташування 612 енергооб'єктів України та на основі статистичного розподілу найбільшої діагоналі ЗП за класами напруги для 963 діючих енергооб'єктів України було розроблено методику формулювання вимог до технічних характеристик приладів проведення ВЕЗ в рамках ЕМД стану ЗП. Однак відсутність рекомендацій щодо застосування існуючих приладів може призвести до неможливості проведення вимірювань на достатню глибину або ж до виникнення значних похибок.

Метою даної роботи є аналіз можливості застосування існуючих приладів ВЕЗ ґрунту в рамках ЕМД на основі статистичної бази даних електрофізичних характеристик ґрунту та геометричних параметрів ЗП діючих енергооб'єктів.

Матеріали дослідження

Для визначення діапазону вимірювання приладів проведення ВЕЗ, використаємо технічні характеристики, які наведені у табл. 1, результати аналізу значень ПЕО ґрунту [4] і геометричних характеристик об'єктів [3]. Для цього необхідно обчислити максимальне ρ_{\max} та мінімальне ρ_{\min} значення ПЕО, які можливо виміряти за допомогою приладів з табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики приладів

Назва приладу	Діапазон вимірювання $R_{l, \lim} - R_{up, \lim}$, Ом	Робоча частота, Гц	Припустимий опір вимірювального кола R_c , кОм
Ф4103-М1	0 – 0,3; 0 – 1;	В межах 265 – 310	2 – потенційного, 1 – струмового
	0 – 3; 0 – 30;		6 – потенційного, 3 – струмового;
	0 – 10^2 ; 0 – $3 \cdot 10^2$; 0 – 10^3 ; 0 – $3 \cdot 10^3$; 0 – $1,5 \cdot 10^4$		12 – потенційного, 6 – струмового;
С.А 6460	$10^{-2} - 2 \cdot 10^3$	128	50
С.А 6470N	$10^{-3} - 10^5$	41 – 512	50
«КДЗ-1У»	$4 \cdot 10^{-2} - 7,5 \cdot 10^3$	57; 211; 419	1

Слід зазначити, що вимірювальний комплекс «КДЗ-1У» має широкі можливості застосування та набір функцій, зокрема, окрім проведення ВЕЗ, дозволяє виконувати: пошук реального місцезнаходження заземлювачів, розташованих під поверхнею землі, вимір опору ЗП та напруги дотику за методом малих струмів, проводити зняття додаткових характеристик для розрахунку напруги дотику. Проте громіздкість

(вага комплексу складає 8,5 кг), низьке значення припустимого опору вимірювального кола та необхідність живлення від мережі змінного струму ставлять значні обмеження у використанні його саме при проведенні ВЕЗ. Тому в подальшому «КДЗ-1У» не буде розглядатися при виконанні оцінки можливості застосування існуючих приладів.

Для знаходження вказаних ПЕО розглянемо електрод радіусом r_0 , занурений вертикально в ґрунт на глибину t . При цьому оцінку виконаємо для значення ПЕО однорідного ґрунту, в якому вказаний електрод має опір R_e [5]:

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{2t}{r_0}, \quad (1)$$

Максимальне значення ПЕО ρ_{\max} , можемо обчислити двома способами. Перший спосіб – оцінити його за припустимим опором вимірювального кола R_c . Враховуючи (1) ρ_{\max} можна визначити як:

$$\rho_{\max} = \pi t R_c \left(\ln \frac{2t}{r_0} \right)^{-1}, \quad (2)$$

При визначенні ρ_{\max} були прийняті наступні значення: $r_0 = 5$ мм, $t = 0,3$ м (типів значення при проведенні ВЕЗ), R_c з табл. 1, при цьому для Ф4103-М1 було взято максимально припустимий опір струмового кола $R_c = 6$ кОм.

Другий спосіб базується на використанні значення верхньої межі вимірювання приладу.

З відомого виразу для уявного ПЕО установки Веннера [3, 5] та відстані між електродами, граничне значення вимірюваного опору R_{\lim} можна записати у вигляді:

$$R_{\lim} = \frac{\rho}{2\pi L_e}, \quad (3)$$

Згідно з (3) максимальне значення $R_{up, \lim}$ буде отримано при мініальному значенні міжелектродної відстані L_e ($L_{e \min} = 0,2$ м при ЕМД стану ЗП) та максимальному значенні ρ_{\max} , тоді ρ_{\max} визначимо за формулою:

$$\rho_{\max} = 2\pi L_{e \min} \cdot R_{up, \lim}. \quad (4)$$

Результати розрахунку максимального значення ПЕО, які можуть бути виміряні вказаними приладами, а також довірчий рівень $\gamma_{up, \lim}$ до їх застосування, наведено в табл. 2. При цьому довірчий рівень $\gamma_{up, \lim}$ було визначено шляхом порівняння розрахованого ρ_{\max} значення ПЕО з гістограмою розподілу ПЕО першого шару ґрунту, отриманої в [4], наприклад, максимальне значення ПЕО першого шару складає 9000 Ом \times м, тому для будь якого $\rho_{\max} \geq 9000$ Ом \times м довірчий рівень $\gamma_{up, \lim}$ буде становити 100 %.

Таблиця 2 – Результати розрахунку максимального значення ПЕО

Параметри оцінки	Ф4103-М1		С.А 6460		С.А 6470N	
	ПЕО, Ом \times м	$\gamma_{up, \lim}$, %	ПЕО, Ом \times м	$\gamma_{up, \lim}$, %	ПЕО, Ом \times м	$\gamma_{up, \lim}$, %
ρ_{\max} визначений за R_c	$1,18 \cdot 10^3$	98,0	$9,8 \cdot 10^3$	100,0	$9,8 \cdot 10^3$	100,0
ρ_{\max} визначений за $R_{up, \lim}$	$18,9 \cdot 10^3$	100,0	$2,5 \cdot 10^3$	99,5	$125 \cdot 10^3$	100,0

Згідно з (1) мінімальне значення $R_{l,lim}$ буде отримано при максимальному значенні міжелектродної відстані L_e , тобто $L_{e,max} = K_{VES} \cdot D$ [3], де D – максимальне значення діагоналі ЗП для відповідного класу напруги при довірчому рівні $\gamma_{l,lim} = 99\%$ та мінімальному значенні ρ_{min} . Тоді ρ_{min} визначимо за формулою:

$$\rho_{min} = 2\pi L_{max} \cdot R_{l,lim} \quad (5)$$

При проведенні розрахунків, враховуючи, що питання необхідної глибини зондування не має однозначного рішення, а на практиці ЕМД стану ЗП для проведення вимірювання опору ЗП та напруги дотику використовується відстань $1,5D - 3D$, (це в цілому збігається з аналізом літературних даних наведених в [2, 3]). В роботі необхідна глибина зондування приймається рівною в межах від однієї до трьох D , тому будемо розглядати два варіанти: $K_{VES} = 1$ та $K_{VES} = 3$.

Прилад Ф4103-М1 є стрілочним, отже, нижня межа вимірювань у нього визначається найменшою ціною поділки на найменшій межі – $R_{l,lim} = 6$ МОм. Для приладів С.А 6460 і С.А 6470N використаємо значення, наведені в табл. 1. Для оцінки довірчого рівня $\gamma_{l,lim}$ застосуємо отриманий статистичний розподіл розміру ЗП за класами напруги (див. табл. 3 та гістограми, наведені в [3]).

Таблиця 3 – Статистичний розподіл розміру ЗП за класами напруги

Клас напруги U_e , кВ	Значення максимального розміру ЗП D , м			
	$\gamma_{l,lim} = 50\%$	$\gamma_{l,lim} = 80\%$	$\gamma_{l,lim} = 90\%$	$\gamma_{l,lim} = 99\%$
35	40	50	80	125
110	100	160	185	250
150	140	180	220	350
≥ 220	400	600	800	1250

Результати розрахунку граничних значень ПЕО ρ_{min} , які можуть вимірювати вказані прилади, а також довірчий рівень до їх застосування, наведено в табл. 4.

Використовуючи властивості ймовірностей і переходячи від довірчого рівня до довірчої ймовірності, визначимо можливість застосування вказаних приладів у залежності від класу напруги та коефіцієнту глибини зондування (див. табл. 5).

Таблиця 4 – Результати розрахунку граничних значень ПЕО

Клас напруги U_e , кВ	Відстань між електродами $L_e = K_{VES} \cdot D$	Ф4103-М1		С.А 6460		С.А 6470N	
		ПЕО, Ом×м	γ , %	ПЕО, Ом×м	γ , %	ПЕО, Ом×м	γ , %
35	D	4,7	99,0	7,9	98,0	0,8	99,0
	$3D$	14,1	96,4	24,0	88,1	2,4	99,0
110	D	9,4	98,0	16,0	94,1	1,6	99,0
	$3D$	28,3	85,1	47,0	69,3	4,7	98,0
150	D	13,2	97,0	22,0	89,1	2,2	99,0
	$3D$	39,6	73,2	66,0	54,5	6,6	98,0
≥ 220	D	47,1	67,3	79,0	46,5	7,9	98,0
	$3D$	141,0	27,7	235,0	13,8	24,0	88,1

Згідно з результатами розрахунку та характеристиками приладів (див. табл. 1-5) можемо зробити наступні висновки, що:

– прилад С.А 6470 N дозволяє проводити вимірювання уявного ПЕО ґрунту на енергооб'єктах усіх

класів напруги;

– прилади Ф4103-М1 та С.А 6460 мають схожі області застосування та дозволяють проводити ВЕЗ ґрунту при ЕМД стану ЗП електричних підстанцій класу напруги 35 кВ і 110 кВ, а застосовувати їх при проведенні ВЕЗ для підстанцій класу напруги 220 кВ та вище не рекомендується;

– для приладу Ф4103-М1 через мале значення припустимого опору вимірювального кола, при проведенні ВЕЗ необхідно користуватися додатковими способами для зменшення опору електродів (зволожувати ґрунт поблизу електроду, розташовувати його «під кутом» для збільшення поверхні контакту з ґрунтом, використовувати груповий електрод тощо).

Таблиця 5 – Ймовірність застосування P , %

Клас напруги U_e , кВ	Відстань між електродами $L_e = K_{VES} \cdot D$	Ймовірність застосування P , %		
		Ф4103-М1	С.А 6460	С.А 6470N
35	D	97,0	97,5	99,0
	$3D$	94,5	87,7	99,0
110	D	96,1	93,6	99,0
	$3D$	83,4	69,0	98,0
150	D	95,1	88,7	99,0
	$3D$	71,8	54,2	98,0
≥ 220	D	66,0	46,3	98,0
	$3D$	27,2	13,8	88,1

Враховуючи зручність та простоту у використанні приладів С.А 6460 та С.А 6470N у порівнянні з Ф4103-М1 (так званий «вимір одним натисненням», відсутність необхідності установки нуля, можливість підключення до ПК), а також на порядок більшу їх вартість, виникає завдання щодо розробки портативного приладу з автономним живленням для проведення ВЕЗ вітчизняного виробництва з оптимальною ціною. Додатково враховуючи створені в [3] вимоги, прилад, що буде розроблятися, повинен мати технічні характеристики, які дозволили б охопити 99,9% ґрунтів в місцях розташування енергооб'єктів України:

– нижня межа вимірювання $R_{l,lim}$ не більше 0,1 МОм

– верхня межа вимірювання $R_{up,lim}$ не менше 7,2 кОм;

– припустимий опір вимірювального кола R_c не менше 66 кОм;

– вимірювальна частота близька до промислової.

Висновки

1 В роботі доведено, що запропонована автором методика, дозволяє не тільки сформулювати вимоги до приладів проведення ВЕЗ в рамках ЕМД стану ЗП, а й оцінити можливість застосування вже існуючих приладів в залежності від класу напруги досліджуваного енергооб'єкту.

2. Встановлено, що найбільш повно вимогам до приладів проведення ВЕЗ відповідає вимірювач С.А 6470N, який дозволяє проводити вимірювання уявного ПЕО ґрунту на енергооб'єктах усіх класів напруги України.

3. Прилади Ф4103-М1 та С.А 6460 можуть бути застосовані виключно при ЕМД стану ЗП електричних

підстанцій класами напруги 35 кВ та 110 кВ.

4. Показана необхідність створення вітчизняного приладу для проведення ВЕЗ в рамках ЕМД стану ЗП з межа вимірювання від 0,1 мОм до 7,2 кОм та опором вимірювального кола до 66 кОм.

Список літератури:

1. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 – [Чинний від 2010-03-29]. – К. : Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).
2. Колиушко Г. М. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок / Г.М. Колиушко, Д.Г. Колиушко, С.С. Руденко // Электротехника и электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 65-70. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.
3. Руденко С. С. Технические требования к приборам для проведения вертикального электрического зондирования грунта при диагностике состояния заземляющих устройств / С. С. Руденко // Электротехника и электромеханика. – 2016. – № 5. – С. 68-73. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.12.
4. Колиушко Д. Г. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко, Г. М. Колиушко // Электротехника и электромеханика. – 2015. – № 3. – С. 67-72. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.
5. Бургсдорф В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – М.: Энергоатом-

издат, 1987. – 400 с.

References (transliterated):

1. Viprobuвання ta kontrol' pristroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya. SOU 31.2-21677681-19:2009 [Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrainy Publ., 2010. 54 p.
2. Koliushko G. M., Koliushko D. G., Rudenko S. S. On the problem of increasing of the computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2014 no.4, pp. 65-70. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13
3. Rudenko S. S. Requirements for devices for vertical electrical sounding of soil at diagnostics of grounding devices. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2016 no.5, pp. 68-73. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.12.
4. Koliushko D. G., Rudenko S. S. Analysis of electro-physical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2015, no.3, pp. 67-72. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10
5. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p.

Надійшла (received) 03.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз можливості застосування існуючих приладів зондування ґрунту в рамках діагностики стану заземлювального пристрою / С. С. Руденко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 75-78. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Анализ возможности применения существующих приборов зондирования грунта в рамках диагностики состояния заземляющих устройств / С. С. Руденко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 75-78. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Analysis of possibility to using existing devices for soil sensing in the diagnostics of the state of the grounding grids / S. S. Rudenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 75-78. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Руденко Сергій Сергійович – молодший науковий співробітник, НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (054) 707-66-71; e-mail:serhij_rudenko@ukr.net

Руденко Сергей Сергеевич – младший научный сотрудник, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ»; тел.: (054) 707-66-71; e-mail:serhij_rudenko@ukr.net

Rudenko Serhij Serhiyovych – Research Assistant, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI"; tel.: (054) 707-66-71; e-mail:serhij_rudenko@ukr.net.