

С.С. Руденко

ТРЕБОВАНИЯ К ПРИБОРАМ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГРУНТА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

На основі аналізу статистичної бази даних з зондування ґрунту та діагностики стану заземлювального пристрою сформульовано вимоги та створено рекомендації щодо вибору приладів для проведення вертикального електричного зондування в залежності від класу напруги енергооб'єкту та довірчої ймовірності. Доведена ефективність вибору приладів на основі оптимальних вимог. Бібл. 7, табл. 6, рис. 5.

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

На основе анализа статистической базы данных по зондированию грунта и диагностики состояния заземляющего устройства сформулированы требования и созданы рекомендации относительно выбора приборов для проведения вертикального электрического зондирования в зависимости от класса напряжения энергообъекта и доверительной вероятности. Доказана эффективность выбора приборов на основе оптимальных требований. Библ. 7, табл. 6, рис. 5.

Ключевые слова: вертикальное электрическое зондирование, заземляющее устройство, грунт, энергообъект, технические требования к приборам.

Постановка проблемы. Целью проведения вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) является определение параметров геоэлектрической структуры – электрофизических характеристик (ЭФХ) грунта: количества слоев, их удельного электрического сопротивления (УЭС) и мощности, путем инжектирования переменного тока генератором и измерения падения напряжения на определенном участке поверхности грунта [1-3]. При этом величина разности токовых и потенциальных электродов обуславливается типом установки и требуемой глубиной зондирования. Аппаратура, методика проведения ВЭЗ и средства интерпретации являются хорошо развитыми как теоретически, так и практически в рамках проведения геологических изысканий [4]. Указанные ЭФХ являются исходными данными для определения нормируемых электрических параметров заземляющего устройства (ЗУ), как на этапе проектирования, так и в процессе его эксплуатации [5]. Поэтому определение их с максимальной достоверностью является одной из важнейших задач.

Приборы для проведения ВЭЗ характеризуются электрическими, массогабаритными и технологическими (автономное или сетевое питание, возможность подключения к ПК, влагостойкость) параметрами. В рамках электромагнитной диагностики состояния заземляющего устройства (ЭМД ЗУ) при проведении ВЭЗ основными параметрами средств измерений являются: класс точности, предел измерения, чувствительность, допустимая величина сопротивления токовой и потенциальной цепи, рабочая частота. Также важным требованием к ним является портативность и возможность работы от аккумулятора, так как ВЭЗ выполняется, как правило, на большом удалении от питающей сети. Рабочая частота выбирается близкой к промышленной, но отличающейся от нее для минимизации влияния электромагнитного поля рабочих токов электроустановки. При проведении ВЭЗ в процессе выполнения ЭМД ЗУ, требования к параметрам приборов (пределу измерения, чувствительности и допустимой величине сопротивления измерительной

цепи) и вообще возможность применения конкретной установки ВЭЗ определяются величиной УЭС и геометрическими размерами ЗУ [1, 5], однако в литературе четкие требования к приборам отсутствуют. Поэтому разработка технических требований к приборам для проведения ВЭЗ в зависимости от величины УЭС грунта и требуемой глубины зондирования является актуальной задачей. Разработку указанных требований предлагается осуществить на основании анализа базы данных проведения ВЭЗ в различных регионах Украины вблизи места расположения энергетических объектов классом напряжения 35 – 750 кВ [5]. Наличие статистических данных об УЭС грунта и размеров ЗУ позволяют сделать вероятностную оценку применимости приборов по их техническим параметрам, при этом следует учесть, что класс напряжения является определяющим для геометрических размеров электроустановки.

Целью работы является разработка научно обоснованных требований к техническим характеристикам приборов для проведения ВЭЗ в рамках выполнения ЭМД ЗУ на основании ЭФХ грунтов для энергообъектов Украины различных классов напряжения.

При формировании требований к приборам для проведения ВЭЗ при ЭМД ЗУ необходимо решить ряд задач в следующей последовательности:

- выполнить статистический анализ УЭС слоев грунта с целью определения вероятности попадания значения УЭС в один из доверительных интервалов;
- оценить требуемую глубину зондирования;
- провести статистический анализ размеров ЗУ для различных классов напряжения;
- определить допустимые величины нижнего и верхнего пределов измерений прибора;
- определить допустимую величину сопротивления измерительной цепи;
- сформулировать обобщенные технические требования к приборам.

1. Статистический анализ УЭС слоев грунта. Для проведения статистического анализа УЭС

© С.С. Руденко

использовалась база данных результатов ВЭЗ, составленная за 7 лет работы с 2007 по 2014 гг. [6]. Указанные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

	Соотношение УЭС			УЭС слоя ρ_i , Ом·м			Мощность УЭС	
	ρ_1/ρ_2	ρ_2/ρ_3	ρ_1/ρ_3	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h_1 , м	h_2 , м
Среднее	5,12	6,03	12,11	183,9	136,93	67,63	0,79	5,46
Медиана	2,75	2,29	4,31	75	29	18	0,45	4
Мода	5	0,5	2	200	15	30	0,2	10
Минимум	0,017	0,004	0,018	3,0	1,2	0,3	0,02	0,01
Максимум	83,3	416,7	625	8700	7000	9000	10	35
Выборка	612	592	592	612	612	592	612	592

Анализ данных, приведенных в табл. 1 [6] минимальных и максимальных значений УЭС различных слоев показал, что приборы для проведения ВЭЗ при диагностике состояния ЗУ, должны обеспечивать измерение УЭС от 0,3 до 9000 Ом·м.

Такой широкий диапазон измерений, с учетом большого разброса требуемой глубины зондирования (она варьируется от нескольких десятков до нескольких сотен метров в зависимости от размеров ЗУ объекта), приводит к увеличению стоимости прибора и большим массогабаритным показателям, а также к необходимости наличия вблизи места проведения ВЭЗ сети или мобильного источника питания (например, дизельного генератора). Однако, следует отметить, что данные значения являются предельными и охватывают все 100 % грунтов и подстанций Украины всех классов напряжения. Для того, чтобы оценить оптимальные требования, воспользуемся гистограммами распределения значений ЭФХ, приведенных в табл. 1 из [6]. Их анализ показывает, что при рассмотрении значений УЭС, как единой совокупности данных и расчете относительной частоты, находящиеся в пределах $\rho \in [3; 9000]$ Ом·м охватывает 99 % случаев, $\rho \in [3; 2000]$ Ом·м – 98 % случаев, а $\rho \in [5,5; 2000]$ Ом·м – 97 %, что может позволить значительно уменьшить требуемый интервал измеряемых значений. Наиболее часто встречающиеся мощности (99 % случаев) лежат в пределах для $h_1 \in [0,1; 7,5]$ м и для $h_2 \in [0,5; 30]$ м.

2. Оценка требуемой глубины зондирования. В [1, 7] показано, что размер ЗУ фактически определяет требуемую глубину зондирования. Однако, как показывает анализ литературы, проведенный в [6], четкая зависимость между размером ЗУ и требуемой глубиной зондирования отсутствует, а зависимость разнеса токовых электродов была получена С.И. Кострубой лишь для установки Бургдорфа еще в 1983 г.:

$$L_C = K_{VES} \sqrt{S}, \quad (1)$$

где L_C – расстояние между токовыми электродами, м; K_{VES} – коэффициент между геометрическим размером подстанции и разнесом электродов, изменяющийся от 1 до 3 в зависимости от площади ЗУ (S), м².

Однако в литературе не приведена подобная или какая-либо иная зависимость для остальных установок ВЭЗ (в частности для наиболее распространенной установки Веннера).

В [1, 7] приведены некоторые данные по исследованию требуемой глубины зондирования, полученные при изучении зависимости величины сопротивления ЗУ от его площади. Из анализа указанных работ следует вывод о необходимости определения строения грунта, как минимум, на глубине порядка \sqrt{S} при уменьшении УЭС с ростом глубины, а при увеличении УЭС нижележащих слоев – необходима информация о строении грунта на глубине нескольких \sqrt{S} .

Кроме того, важным практическим вопросом является глубинность установки, т.е. зависимость глубины зондирования конкретной установки от величины разнеса токовых (или потенциальных) электродов. Глубинность зондирования различными установками ВЭЗ изучается более восьмидесяти лет начиная с 30-х гг. прошлого века и данный вопрос претерпел 3 основных этапа своего развития: в 30-е гг. им занимался К. Шлюмберже, в 1970 г. – Рой и Аппаро и последний этап исследований, начавшийся в конце 80-х гг. с работы Баркера и длящийся до сих пор [3]. Основными способами оценки глубинности на данный момент являются: зависимость плотности тока от глубины, производной плотности тока от глубины, функция Меррика, а также использование формул Дар-Заррук. При этом для плотности тока берется убывание его значения до 50-80 %, а для зависимости производной плотности тока от глубины и функции Меррика берутся их экстремумы. В соответствии с приведенными данными в работах по геофизическим изысканиям глубинность для установки Шлюмберже (установка Веннера является фактически ее частным случаем) в долях от разнеса токовых электродов меняется от $1/10 L_C$ до $1/2,5 L_C$, при этом в литературе [3] известны случаи, когда глубинность уменьшается до $1/200 L_C$ под влиянием макроанизотропии и соотношения УЭС слоев.

Таким образом, в работах, посвященных проведению ВЭЗ в целях проектирования или диагностики ЗУ, существует неоднозначная информация о требуемой глубине зондирования, которая должна определяться размерами ЗУ и УЭС грунта. В рамках данной работы примем допущение, традиционное для практики проведения ВЭЗ в целях проектирования и диагностики ЗУ: глубинность зондирования установкой Веннера равна одной трети величины разнеса токовых электродов (т.е. межэлектродному расстоянию между двумя ближайшими электродами L_e). Учитывая, что вопрос требуемой глубины зондирования все еще не имеет однозначного решения, а в практике ЭМД ЗУ для проведения измерения сопротивления ЗУ и напряжения прикосновения используется расстояние $(1,5 - 3)D$, где D – наибольшая диагональ ЗУ, то в работе рассмотрим требуемую глубину зондирования в пределах от одной до трех D . Поэтому для установки Веннера будет справедливым выражение:

$$L_e = K_{VES} D, \quad (2)$$

где K_{VES} лежит в пределах от 1 до 3.

При этом выражение (1) для определения расстояния между токовыми электродами соответственно примет вид:

$$L_C = 3K_{VES} D. \quad (3)$$

3. Статистический анализ размеров ЗУ для различных классов напряжения. Размер ЗУ, как указывалось ранее, определяет требуемую глубину зондирования при проведении ЭМД ЗУ. На рис. 1 приведена гистограмма процентного распределения f наибольшей диагонали D для 963 электрических подстанций, диагностика состояния ЗУ которых была проведена в период с 1999 по 2015 гг.

Из анализа рис. 1 следует, что для 58 % ЗУ значение наибольшей диагонали лежит в пределах 10-100 м, т.е. величина разности токовых электродов при применении установки Веннера, согласно (3), составляет 90 – 900 м (при коэффициенте разноса $K_{VES} = 3$) и может быть реализована на практике.

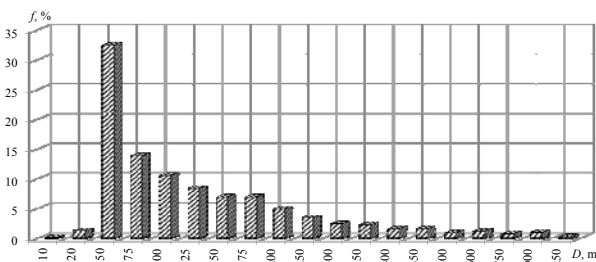


Рис. 1. Плотность вероятности значений наибольшей диагонали D ЗУ энергообъектов Украины

На рис. 2 – 5 приведены гистограммы процентного распределения f длины наибольшей диагонали по различным классам напряжения.

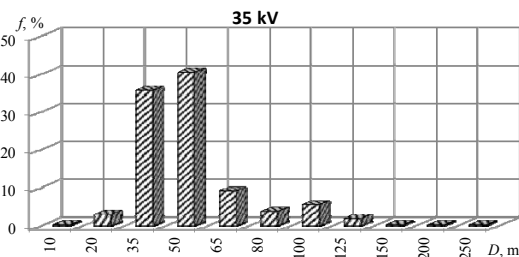


Рис. 2. Плотность вероятности максимального размера D ЗУ подстанции 35 кВ

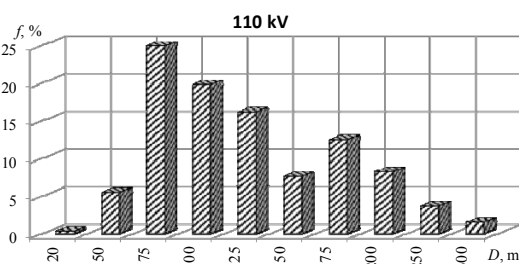


Рис. 3. Плотность вероятности максимального размера D ЗУ подстанции 110 кВ

Исходя из гистограмм, представленных на рис. 2 – 4, в табл. 2 приведены данные по максимальным размерам диагоналей ЗУ для доверительного интервала с уровнем доверия γ равным 50 %, 80 %, 90 % и 99 % обследованных энергообъектов соответствующих классов напряжения. Например, это значит, что 80 % подстанций классом напряжения $U = 110$ кВ имеют максимальную длину диагонали ЗУ $D \leq 160$ м, а $D \leq 250$ м у 99 % подстанций указанного класса напряжения.

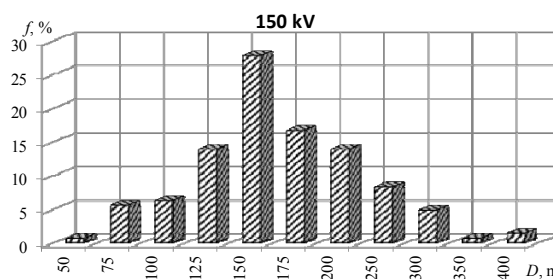


Рис. 4. Плотность вероятности максимального размера D ЗУ подстанции 150 кВ

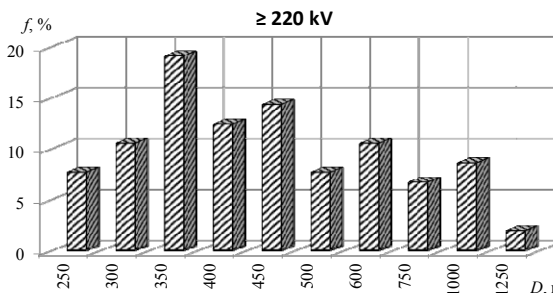


Рис. 5. Плотность вероятности максимального размера D ЗУ подстанции 220 кВ и выше

Таблица 2

Класс напряжения U , кВ	Значение максимального размера ЗУ D , м			
	$\gamma = 50 \%$	$\gamma = 80 \%$	$\gamma = 90 \%$	$\gamma = 99 \%$
35	40	50	80	125
110	100	160	185	250
150	140	180	220	350
≥ 220	400	600	800	1250

Таким образом, полученные значения указывают на значительный разброс максимальной диагонали ЗУ для энергообъектов различного класса напряжения, но при этом позволяют оценить допустимую величину нижнего предела измерения при задании уровня доверия для соответствующего класса напряжения.

4. Определение допустимых величин нижнего и верхнего пределов измерения прибора. Значение кажущегося УЭС всегда будет находиться в интервале между минимальным и максимальным значением УЭС слоев геоэлектрической структуры, поэтому для определения технических требований к приборам для проведения ВЭС с помощью установки Веннера и их вероятностной оценки воспользуемся определенными ранее [6] статистическими данными ЭФХ. Исходя из выражения для кажущегося УЭС установки Веннера и расстояния между электродами, измеряемое предельное значение сопротивления R_{lim} можно записать в виде:

$$R_{lim} = \frac{\rho}{2\pi L_e}, \quad (4)$$

где ρ – кажущееся значение УЭС.

Для определения нижнего предела измерения используем минимальное значение УЭС первого слоя, взятое из табл. 1, а межэлектродное расстояние L_e вычислим по формуле (2), где длина наибольшей диагонали ЗУ D из табл. 2 при соответствующем уровне доверия.

В табл. 3 приведены значения нижнего предела измерения прибора R_{lim} , при $K_{VES} = 1-3$. Полученные значения показывают, что, например, при проведении

ВЭЗ на глубину зондирования равную одной диагонали энергообъекта ($K_{VES} = 1$) для 90 % энергообъектов классом напряжения 110 кВ прибор должен иметь нижний предел измерения не более 2,6 мОм.

Таким образом, полученные данные позволяют оценить применимость прибора для проведения ВЭЗ по его нижнему пределу измерения для энергообъектов различного класса напряжения с учетом трех принятых величин межэлектродного расстояния.

Таблица 3

Уровень доверия $\gamma, \%$	Межэлектродное расстояние L_e	Нижний предел измерения прибора $R_{l.lim}$, мОм, для классов напряжения:			
		$U = 35$ кВ	$U = 110$ кВ	$U = 150$ кВ	$U \geq 220$ кВ
50 %	3D	4	1,6	1,1	0,4
	2D	6	2,4	1,7	0,6
	D	11,9	4,8	3,4	1,2
80 %	3D	3,2	1	0,9	0,3
	2D	4,8	1,5	1,3	0,4
	D	9,5	3	2,7	0,8
90 %	3D	2	0,9	0,7	0,2
	2D	3	1,3	1,1	0,3
	D	6	2,6	2,2	0,6
99 %	3D	1,3	0,6	0,5	0,1
	2D	1,9	1	0,7	0,2
	D	3,8	1,9	1,4	0,4

Для определения верхнего предела измерения и сопротивления измерительных электродов зададимся несколькими уровнями доверия (95 %, 99,9 % и 100 %) и рассмотрим соответствующие им значения УЭС первого слоя:

- 600 Ом·м (доверительный интервал охватывает до 95 % значений ρ_1);
- 2000 Ом·м (доверительный интервал охватывает до 99,9 % значений ρ_1);
- 9000 Ом·м (доверительный интервал охватывает 100 % значений ρ_1).

Для определения верхнего предела измерения следует рассмотреть наименьшую величину межэлектродного расстояния L_e , которая определяется из условия $L_e \geq 3t$ и $L_e \geq 6r_0$, где t и r_0 – глубина погружения и радиус электрода соответственно. Как правило, в практике ЭМД ЗУ L_{min} составляет 0,2 м. Результаты расчета с использованием (2), с учетом величины УЭС и заданными уровнями доверия, приведены в табл. 4.

Таблица 4

УЭС грунта ρ_{max} , Ом·м	Уровень доверия $\gamma, \%$	Верхний предел измерения прибора $R_{up.lim}$, Ом
600	95,0	480
2000	99,9	1600
9000	100,0	7170

Полученные результаты устанавливают вероятностную зависимость для верхнего и нижнего пределов измерения приборов для проведения ВЭЗ при ЭМД ЗУ энергетических объектов Украины, и существенное увеличение указанных в табл. 3 и 4 пределов

(что, как правило, сопряжено со значительным увеличением мощности и стоимости прибора) в большинстве случаев может быть неоправданно.

5. Определение допустимой величины сопротивления измерительной цепи прибора. При нахождении допустимого сопротивления токовой и потенциальной цепей рассмотрим электрод радиусом r_0 , погруженный вертикально в грунт на глубину t . Так как ограничиваемой величиной является максимально возможное сопротивление электрода, то оценку следует выполнить для максимального значения УЭС однородного грунта, в котором указаный электрод, как известно [7], имеет сопротивление:

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi t} \ln \frac{2t}{r_0}, \quad (5)$$

При проведении ВЭЗ в рамках ЭМД ЗУ автором совместно с сотрудниками НИПКИ «Молния» используются электроды радиусом от 4 мм до 10 мм, которые забиваются в процессе измерения на глубину от 50 до 500 мм.

Результаты расчета сопротивления измерительного электрода для УЭС и доверительных интервалов из табл. 4 приведены в табл. 5.

Таблица 5

УЭС грунта ρ , Ом·м	Уровень доверия $\gamma, \%$	Глубина погружения электрода t , м	Сопротивление измерительного электрода R_e , Ом:	
			при $r_0 = 4$ мм	при $r_0 = 10$ мм
600	95,0	0,05	6150	4400
		0,1	3740	2870
		0,2	2200	1770
		0,3	1600	1310
		0,5	1060	880
2000	99,9	0,05	20500	14660
		0,1	12460	9540
		0,2	7330	5880
		0,3	5320	4350
		0,5	3520	2940
9000	100,0	0,05	92220	65970
		0,1	56040	42920
		0,2	32990	26420
		0,3	23930	19550
		0,5	15820	13200

Полученные данные позволяют сформулировать требования к допустимому сопротивлению измерительной цепи приборов для проведения ВЭЗ, а также учесть диаметр измерительных электродов и глубину их погружения.

7. Формулировка обобщенных технических требований к приборам. Оценивая характеристики прибора, можно сделать вывод о применимости его с определенной вероятностью с учетом наибольшей длины диагонали ЗУ и класса напряжения энергообъекта. Для этого перейдем от доверительного уровня γ к доверительной вероятности P (вероятности охватываемости). P получена, исходя из свойства вероятности о наступлении трех независимых событий, и определяется согласно выражению (6):

$$P = P_{l.lim} \cdot P_{up.lim} \cdot P_C, \quad (6)$$

где $P_{l,lim}$ – доверительная вероятность на основании табл. 3; $P_{up,lim}$ – доверительная вероятность на основании табл. 4; P_C – доверительная вероятность на основании табл. 5.

В табл. 6 приведены обобщенные вероятностные требования к характеристикам прибора для проведения ВЭЗ. При этом учтено, что на практике при проведении ВЭЗ глубина погружения измерительных электродов t в среднем составляет 0,2 м, а сопротивление самой измерительной цепи R_c будет равно удвоенному сопротивлению электрода R_e из табл. 5.

Таблица 6

Класс напряжения U , кВ	R_c , кОм	$R_{up,lim}$, кОм	$R_{l,lim}$, мОм		
			$L_e = D$	$L_e = 2D$	$L_e = 3D$
При доверительной вероятности $P = 0,791$					
35	15	1,6	9,5	4,8	3,2
110			3,0	1,5	1,0
150			2,7	1,3	0,9
≥ 220			0,8	0,4	0,3
При доверительной вероятности $P = 0,899$					
35	66	6,4	6,0	3,0	1,3
110			2,6	1,3	0,6
150			2,2	1,1	0,5
≥ 220			0,6	0,3	0,1
При доверительной вероятности $P = 0,99$					
35	66	7,2	3,8	1,9	1,3
110			1,9	1,0	0,6
150			1,4	0,7	0,5
≥ 220			0,4	0,2	0,1

Рассмотрим на примере применение табл. 6 при выборе прибора для проведения ВЭЗ для подстанций классом напряжения:

1) $U = 35$ кВ. В качестве исходных данных задан:

- величиной межэлектродного расстояния равно трем диагоналям ЗУ ($L_e = 3D$);
- доверительной вероятностью $P = 0,99$.

Следовательно, для подстанций классом напряжения 35 кВ при заданных параметрах прибор должен иметь диапазон измерений от 1,3 мОм до 7,2 кОм и допускать сопротивление токовой и потенциальной цепей до 66 кОм.

2) $U = 150$ кВ. В качестве исходных данных задан:

- величиной межэлектродного расстояния, равного двум диагоналям ЗУ ($L_e = 2D$);
- доверительной вероятностью $P = 0,899$.

Следовательно, для подстанций классом напряжения 150 кВ при заданных параметрах прибор должен иметь диапазон измерений от 1,1 мОм до 6,4 кОм и допускать сопротивление токовой и потенциальной цепей до 66 кОм.

Выводы.

В работе впервые применен статистический подход для оценки оптимальных технических требований к приборам для проведения ВЭЗ в целях ЭМД ЗУ энергетических объектов Украины. Полученные ранее статистические данные по УЭС грунта позволили

разбить значительный диапазон значений УЭС на ряд доверительных интервалов, характеризующихся доверительной вероятностью охватывания.

Для оценки требуемой глубины зондирования в работе проанализированы статистическое распределение длины наибольшей диагонали ЗУ по классам напряжения. Зависимости значения нижнего предела приборов от класса напряжения и заданной величины уровня доверия определены исходя из требуемой глубины зондирования и статистических данных о наибольшей диагонали ЗУ действующих энергетических объектов Украины, а значения верхнего предела – исходя из статистического распределения УЭС для соответствующего уровня доверия.

Результаты, полученные в работе, устанавливают вероятностную взаимосвязь между техническими характеристиками прибора, фактической глубиной зондирования установкой Веннера (межэлектродным расстоянием) и классом напряжения объекта. Это позволяет оптимально выбрать прибор в зависимости от конкретных параметров объекта, так как некорректный выбор прибора приводит или к невозможности проведения полноценных измерений, или к значительному увеличению стоимости и массогабаритных характеристик прибора. Установлено, что прибор для проведения ВЭЗ в рамках ЭМД состояния ЗУ энергообъектов Украины для охватывания всех классов напряжения и возможных значений УЭС грунта должен иметь предел измерения от 0,1 мОм до 7,2 кОм и допускать сопротивление измерительной цепи до 66 кОм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербух М.А., Забусов В.В., Пантелеев В.И. Системный подход к оценке заземляющих сетей электроустановок серверных промышленных комплексов. – Красноярск: СФУ, 2009. – 164 с.
2. Hördt A. Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik und Geoelektrik. – Braunschweig: Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, 2006. – 11 s.
3. Шевнин В.А., Колесников В.П. Оценка глубинности ВЭЗ для однородной и слоистой среды // Георазрез. – 2011. – №1(8). – С. 1-9. – Электронный ресурс / Режим доступа: http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Otsenka_glubinnosti_VEZ.pdf.
4. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. – М.: Научный мир, 2007. – 248 с.
5. Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г., Руденко С.С. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок // Электротехника і електромеханіка. – 2014. – №4. – С. 65-70. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.
6. Колиушко Д.Г., Руденко С.С., Колиушко Г.М. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – № 3. – С. 67-72. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.
7. 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. Averbukh M.A. Zabusov V.V., Pantelev V.I. *Sistemnyi podkhod k otsenke zazemliayushchikh setei elektroustanovok*

severnykh promyshlennykh kompleksov [The systematic approach to the evaluation of grounding grids electrical installations of northern industrial complexes]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2009. 164 p. (Rus).

2. Hördt A. *Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik und Geoelektrik*. Technische Universität Braunschweig Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, 2006. 11 p. (Ger).

3. Shevnin V.A., Kolesnikov W.P. Rating depth VES for the uniform and layered medium. *Electronic Journal «GEORazrez»*, 2011, no.1(8), pp. 1-9. Available at: http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Otcenka_glubinnosti_VEZ.pdf (Accessed 10 November 2013). (Rus).

4. Kolesnikov V.P. *Osnovy interpretatsii elektricheskikh zondirovaniy* [Fundamentals of electrical sounding interpretation]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2007. 248 p. (Rus).

5. 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.

6. 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.

7. Borisov R.K., Gorshkov A.V., Zharkov Y.V. *Zazemliayushchie ustroystva elektroustanovok (trebovaniia normativnykh dokumentov, raschet, proektirovanie, 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) 02.09.2016

Руденко Сергей Сергеевич, аспирант, м.н.с.,
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,
e-mail: nio5_molnaya@ukr.net

S.S. Rudenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Requirements for devices for vertical electrical sounding of soil at diagnostics of grounding devices.

Purpose. Creation the scientific requirements for technical characteristics of equipment for vertical electrical sounding based on the electrophysical characteristics of the soil of energy objects with the different voltage classes. **Methodology.** In work used statistical methods for the analysis database of results the soil sounding and for receiving distribution of largest size of the grounding system. To determine the required range of measurement and permissible value of circuit resistance applied the mathematical description of the electromagnetic field to calculate the apparent resistivity of the soil and the Wenner method of calculating the resistance of a vertical electrode. Also, in work used elements of probability theory to creation the stochastic correlation between device parameters and characteristics object of the research. **Results.** In the paper found that in the most severe cases (when the depth of sounding is the three maximal diagonal of grounding) at 99% energy objects in Ukraine the lower limit of resistance measurement for the respective classes of voltage must be no more than 1.3 milliohms to 35 kV, 0.6 mOhm to 110 kV, 0.5 milliohms to 150 kV, 0.1 mOhm for ≥ 220 kV. Also it proved that the measurement equipment for vertical electrical sounding when performing electromagnetic diagnostics of grounding system the power facilities Ukraine with 35-750 kV voltage class for all possible values of soil resistivity should be with limit of measurement from 0.1 mOhm to 7.2 kOhm and resistance measuring circuit to 66 kOhm. **Originality.** For the first time used a statistical approach to evaluate the optimal technical requirements for equipment the soils resistivity when performing diagnostics of grounding systems energy objects of Ukraine. The results obtained in this work, establish the probabilistic dependence of the technical characteristics of measuring equipment from the actual depth of sounding in Wenner's configuration (the distance between electrodes) and from the voltage class of object. **Practical value.** The obtained results allow depending on the specific parameters of the object optimally select the equipment. This technique allows you to create a range of equipments with optimal cost and overall dimensions depending on the region (considering to a significant spread of values of soil resistivity) and on the voltage class of investigated object. References 7, tables 6, figures 5.

Key words: vertical electrical sounding, grounding device, soil, energy object, technical requirements for equipment.