

И.В. Нижевский, В.И. Нижевский, В.Е. Бондаренко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Розглянуто експериментальні дослідження трьохелектродної установки для вимірювання опору заземлюючих пристроїв різного призначення. На основі використання методу фізичного моделювання представлено експериментальне обґрунтування методу вимірювання опору заземлюючих пристроїв будь-якої конструкції в довільній структурі ґрунту. За результатами моделювання розв'язана система рівнянь шостого порядку, що дозволило визначити власні і взаємні опори в трьохелектродній установці з досить високою точністю і без відшукування точки нульового потенціалу. Бібл. 7, табл. 10, рис. 5.

Ключові слова: експериментальні дослідження, заземлюючий пристрій, метод вимірювання опору, трьохелектродна установка, метод фізичного моделювання, експериментальне обґрунтування.

Рассмотрены экспериментальные исследования трехэлектродной установки для измерения сопротивления заземляющих устройств различного назначения. На основе использования метода физического моделирования представлено экспериментальное обоснование метода измерения сопротивления заземляющего устройства любой конструкции в произвольной структуре грунта. По результатам моделирования решена система уравнений шестого порядка, что позволило определить собственные и взаимные сопротивления в трехэлектродной установке с достаточно высокой точностью и без отыскания точки нулевого потенциала. Библ. 7, табл. 10, рис. 5.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, заземляющее устройство, метод измерения сопротивления, трехэлектродная установка, метод физического моделирования, экспериментальное обоснование.

Введение и постановка проблемы. В настоящее время для измерения сопротивления заземляющих устройств (ЗУ) получила широкое распространение трехэлектродная измерительная установка [1]. Одной из главных задач, которую необходимо решить для получения с помощью этой установки достаточно точных результатов, является, как указано в работе [2], правильный выбор мест расположения измерительных электродов, т. е. такая их расстановка, при которой измеренное значение сопротивления отличается от его истинного значения не более чем на 10 % в ту или иную сторону. Однако во многих случаях (50 %) измерение сопротивления ЗУ городских и промышленных подстанций представляет серьезную проблему до настоящего времени.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблемой повышения точности измерения электрических параметров земли и ЗУ занимаются многие ученые как отечественные, так и зарубежные.

Расчетный метод определения оптимального расположения измерительных электродов при измерении сопротивления заземлителей больших размеров, позволяющий размещать электроды на близких расстояниях от заземлителя, описан в работе [3]. Однако при этом отмечено, что расчеты с помощью рассматриваемых моделей заземлителей имеют лишь ограниченное применение, связанное с их внешними полями.

Анализ методов Тагга при измерениях сопротивления заземлителей, приведенный в работе [4], показал, что метод Тагга не пригоден в грунтах с возрастанием удельного сопротивления грунта по глубине.

Принципиальная возможность точного измерения сопротивления заземлителя при любом характере неоднородности грунта и любых размерах и конфигурации ЗУ, без использования расчетных программ, отмечена в работе [5]. Однако, к сожалению, и в этом

случае необходимо будет определять местоположение потенциального электрода путем отыскания точки нулевого потенциала на месте измерений.

Математическое моделирование процесса измерений сопротивления заземлителя тока промышленной частоты в многослойном грунте представлено в работе [6], где описан алгоритм вычисления погрешностей измерения при различных расположениях измерительных электродов и приведен пример построения линий равных погрешностей для заземлителя сложной формы в четырехслойном грунте. К сожалению, как отмечают авторы [6], выбрать такое расположение электродов, при котором измеренное сопротивление заземлителя равняется истинному, экспериментальным путем при измерениях на местности невозможно.

В работе [7] приводится теоретическое обоснование нового метода измерения сопротивления заземлителя с помощью трехэлектродной измерительной установки при любом характере неоднородности грунта, любых размерах и конфигурации ЗУ и произвольном размещении измерительных электродов без отыскания точки нулевого потенциала.

Целью работы является экспериментальное обоснование метода [7] измерения сопротивления заземлителя с помощью трехэлектродной измерительной установки без отыскания точки нулевого потенциала.

Методика проведения эксперимента. Для исследования были приняты модели заземлителей в виде дисков различных диаметров $d_1=10$ см, $d_2=5$ см, $d_3=9$ см. Места расположения заземлителей в электролитической ванне показаны на рис. 1 и не изменялись во всех опытах. Минимальные расстояния между краями заземлителей составляли $a=b=c=1$ см. Было выполнено несколько серий опытов.

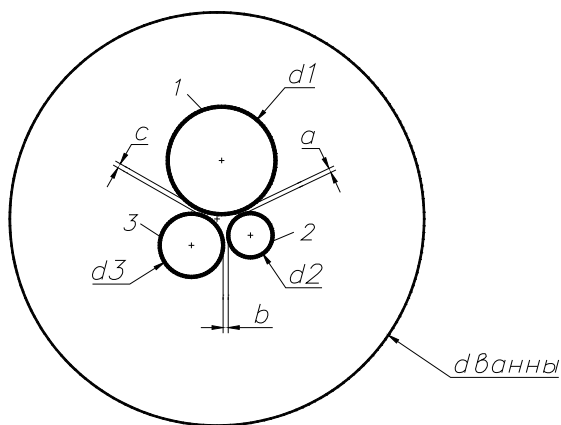


Рис. 1. Расположение заземлителей на поверхности воды в электролитической ванне (вид в плане)

В **первой серии** были выполнены измерения стекающего с заземлителя тока (I_{10} , I_{20} , I_{30}) и напряжения (U_{10} , U_{20} , U_{30}) для определения собственных сопротивлений заземлителей, т.е. каждого на своем месте в отсутствии остальных, как показано на рис. 2 для заземлителя 1 и пунктиром для заземлителей 2 и 3. Результаты измерений и расчетов собственных сопротивлений заземлителей (R_{10} , R_{20} и R_{30}) приведены в табл. 1

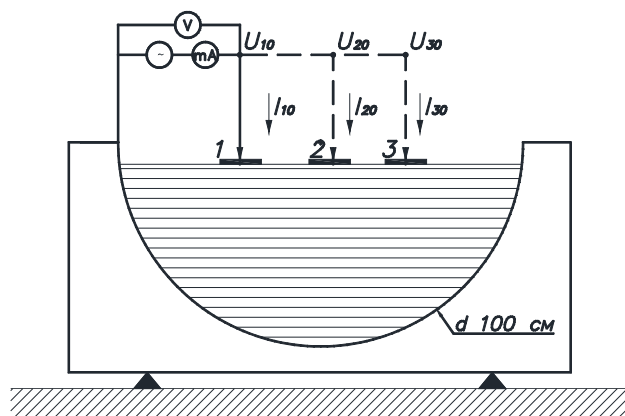


Рис. 2. Схематическое расположение заземлителей в электролитической ванне (вид в разрезе) и подключение приборов для измерений

Таблица 1

Результаты измерений и расчетов собственных сопротивлений заземлителей

Номер заземлителя	1			2			3			
	Измеряемый параметр	I_{10} , мА	U_{10} , В	R_{10} , Ом	I_{20} , мА	U_{20} , В	R_{20} , Ом	I_{30} , мА	U_{30} , В	R_{30} , Ом
Величина параметра	159	8,63	54,28	84	8,8	104,76	146	8,65	59,246	

Вторая серия опытов проведена с использованием трех заземлителей. В данном случае источник подключался к заземлителю 1 и к корпусу ванны, т.е. ток вводился в первый заземлитель. Проводились измерения тока I_{10} в цепи, напряжения на заземлителях 1, 2 и 3 относительно корпуса ванны (U_{10} , U_{20} , U_{30}), напряжения между заземлителями 1 и 2 (U_{12}), заземлителями 1 и 3 (U_{13}), а также заземлителями 2 и 3 (U_{23}) по схеме, приведенной на рис. 3.

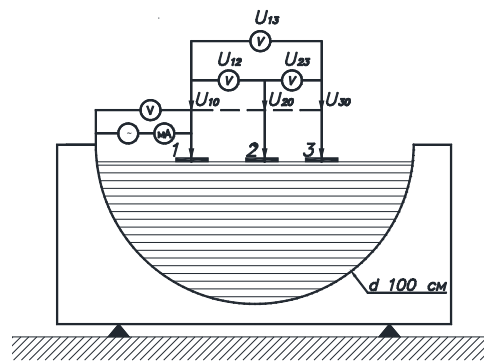


Рис. 3. Схематическое расположение заземлителей в электролитической ванне (вид в разрезе) и подключение приборов для измерений

Аналогичные измерения выполнены и для случаев подключения источника между корпусом ванны и заземлителем 2, а затем и заземлителем 3. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений при подключении источника между корпусом ванны и заземлителем

Ввод источника в заземлитель 1		Ввод источника в заземлитель 2		Ввод источника в заземлитель 3	
Измеряемый параметр	Величина параметра	Измеряемый параметр	Величина параметра	Измеряемый параметр	Величина параметра
I_{10} , мА	159,4	I_{20} , мА	82,1	I_{30} , мА	137,2
U_{10} , В	8,7	U_{20} , В	8,89	U_{30} , В	8,75
U_{12} , В	7,7	U_{12} , В	8,4	U_{12} , В	0,3
U_{13} , В	7,9	U_{13} , В	0,01	U_{13} , В	7,7
U_{23} , В	0,2	U_{23} , В	8,4	U_{23} , В	7,4

Затем в **третьей серии** были проведены исследования с тремя заземлителями без их связи с ванной. В данном случае источник вводился между заземлителями 1 и 2, как показано на рис. 4. При этом измерялся протекающий в цепи ток I_{12} и напряжение между заземлителями 1 и 2 (U_{12}), заземлителями 1 и 3 (U_{13}), заземлителями 2 и 3 (U_{23}), а также напряжение между каждым заземлителем (1, 2 или 3) и стенкой (корпусом) ванны, т.е. U_{10} , U_{20} и U_{30} , как показано на рис. 4 для заземлителя 3.

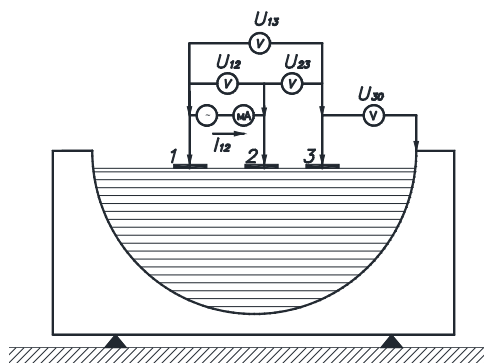


Рис. 4. Схема измерений для трех заземлителей без их связи с корпусом ванны

Аналогичные измерения были выполнены при вводе источника между заземлителями 2 и 3, а также между заземлителями 1 и 3. Результаты этих измерений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений параметров заземлителей без связи источника с корпусом ванны

Измеряемый параметр	Ввод источника между заземлителями 1 и 2	Ввод источника между заземлителями 1 и 3	Ввод источника между заземлителями 2 и 3
I_{12} , мА	70,4	–	–
I_{13} , мА	–	103,6	–
I_{23} , мА	–	–	70,1
U_{12} , В	8,97	4,175	5,447
U_{13} , В	3,27	8,65	3,05
U_{23} , В	5,7	4,475	8,5
U_{10} , В	2,34	3,58	0,65
U_{20} , В	6,62	0,6	6,1
U_{30} , В	0,94	5,1	2,4

В четвертой серии опытов были выполнены измерения с двумя заземлителями, т.е. в отсутствие третьего и без связи их с корпусом ванны. Источник включался между заземлителями 1 и 2, как показано на рис. 5. При этом измерялся протекающий в цепи ток (I_{12}), напряжение между заземлителями 1 и 2 (U_{12}) и напряжение между корпусом ванны и заземлителем 1 (U_{10}), а также между корпусом ванны и заземлителем 2 (U_{20}).

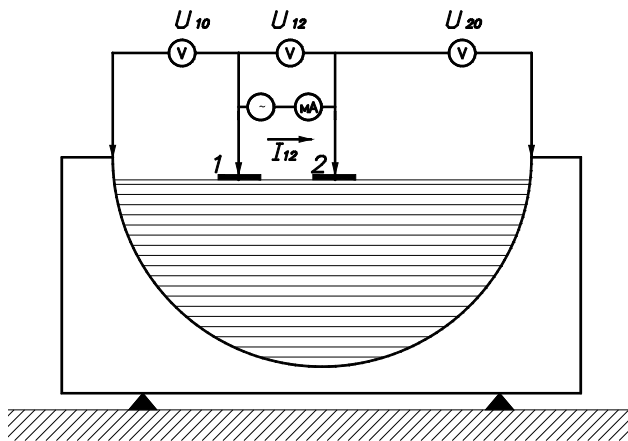


Рис. 5. Схема измерений для двух заземлителей без их связи с корпусом ванны

Аналогичные измерения выполнены и при включении источника между заземлителями 1 и 3, а также между заземлителями 2 и 3. Результаты измерений представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерений для двух заземлителей без их связи с корпусом ванны

Измеряемый параметр	Ввод источника между заземлителями 1 и 2	Ввод источника между заземлителями 1 и 3	Ввод источника между заземлителями 2 и 3
I_{12} , мА	71,6	–	–
I_{13} , мА	–	105,3	–
I_{23} , мА	–	–	69,8
U_{12} , В	8,9	–	–
U_{13} , В	–	8,8	–
U_{23} , В	–	–	8,8
U_{10} , В	2,4	3,7	–
U_{20} , В	6,5	–	6
U_{30} , В	–	5,1	2,8

Сопоставительный анализ результатов физического моделирования трехэлементной группы заземлителей и результатов определения по разработанному методу измерения собственных и взаимных сопротивлений заземлителей. По результатам экспериментов для моделей заземлителей при измерениях получены параметры, которые приведены в табл. 5. При этом определение удельного сопротивления среды дает $\rho = 12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, т.е. $\Delta R = 3,8 \text{ Ом}$ – поправка на конечные размеры ванны, определенная по формуле для полусферы.

Таблица 5

Результаты оценки собственных сопротивлений заземлителей

Определяемый параметр	Собственные сопротивления, Ом		
	R_1	R_2	R_3
По табл. 1	54,28	104,76	59,246
С учетом ΔR	58,08	108,56	63,046

Результаты измерений, представленные в табл. 4, позволяют определить входные сопротивления при вводе источника между заземлителями, например 1 и 2, по выражению

$$R_{12\text{inp}} = U_{12} / I_{12} = 8,9 / 0,0716 = 124,3 \text{ Ом}.$$

Аналогично получаем $R_{13\text{inp}}$ и $R_{23\text{inp}}$. Результаты сводим в табл. 6.

Таблица 6

Результаты оценки входных сопротивлений для двух заземлителей без их связи с ванной

Определяемый параметр	Входные сопротивления между заземлителями, Ом		
	$R_{12\text{inp}}$	$R_{13\text{inp}}$	$R_{23\text{inp}}$
Значение параметра	124,3	83,6	126

Полученные результаты входных сопротивлений (см. табл. 6) позволяют определить приближенные значения собственных сопротивлений отдельных заземлителей следующим образом.

Измерения, выполненные для соответствующих пар заземлителей, т.е. входные сопротивления между соответствующими заземлителями (табл. 6), позволяют записать следующие уравнения

$$\begin{aligned} R_1 + R_2 - 2R_{12} &= R_{12\text{inp}}; \\ R_1 + R_3 - 2R_{13} &= R_{13\text{inp}}; \\ R_2 + R_3 - 2R_{23} &= R_{23\text{inp}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Пренебрегая (допущение) взаимными сопротивлениями (R_{12} , R_{13} и R_{23}) в пределах пары и влиянием третьего электрода получаем систему трех уравнений с тремя неизвестными. Производим решение этой системы, и результаты вычислений приближенных значений собственных сопротивлений заземлителей сводим в табл. 7.

Таблица 7

Приближенные значения собственных сопротивлений заземлителей

Определяемый параметр	Собственные сопротивления, Ом		
	R_1	R_2	R_3
Значение параметра	40,95	83,35	42,65

Приближенные значения взаимных сопротивлений соответствующих пар заземлителей вычисляем исходя из того, что взаимное сопротивление двух

взаимодействующих заземлителей всегда меньше сопротивления наименьшего из них [4]. Исходя из соотношения (1):

$$R_{12mut} = (R_1 + R_2 - R_{12imp})/2 = (58,08 + 108,56 - 124,3)/2 = 21,17 \text{ Ом.}$$

Аналогично вычисляем взаимные сопротивления R_{13mut} и R_{23mut} и результаты сводим в табл. 8.

Таблица 8

Оценка взаимных сопротивлений между соответствующими парами заземлителей

Определяемый параметр	Взаимные сопротивления между заземлителями, Ом		
	R_{12mut}	R_{13mut}	R_{23mut}
Значение параметра	21,17	18,79	22,8

Полученные приближенные значения параметров схемы (см. табл. 7 и табл. 8), в соответствии с методикой, изложенной в работе [7], вводим в качестве начальных значений для решения системы шести уравнений с шестью неизвестными, у которых правые части представлены на основе измерений, приведенных в табл. 3, следующим образом.

Результаты измерений напряжений U_{13} и U_{23} и тока I_{12} при вводе источника между заземлителями 1 и 2 позволяют получить входные сопротивления:

$$R_{13A} = U_{13}/I_{12} = 46,45 \text{ Ом;}$$

$$R_{32A} = U_{23}/I_{12} = 81,1 \text{ Ом.}$$

Результаты аналогичных расчетов при вводе источника между заземлителями 2 и 3, а также заземлителями 1 и 3 приведены в табл. 9.

Таблица 9

Результаты оценки входных сопротивлений при вводе источника между соответствующими заземлителями

Подключение источника	Между заземлителями 1 и 2		Между заземлителями 1 и 3		Между заземлителями 2 и 3	
	R_{13A}	R_{32A}	R_{12B}	R_{32B}	R_{12C}	R_{13C}
Определяемый параметр	R_{13A}	R_{32A}	R_{12B}	R_{32B}	R_{12C}	R_{13C}
Значение параметра, Ом	46,45	81,1	40,3	43,2	77,7	43,599

Результаты решения системы уравнений [7] по разработанной автором в пакете MathCad программе, сводим в табл. 10.

Таблица 10

Оценка расхождений расчетных и экспериментальных значений собственных и взаимных сопротивлений заземлителей

Параметр, Ом	R_1	R_2	R_3	R_{12}	R_{13}	R_{23}
Начальное значение	40,95	83,35	42,65	21,17	18,79	22,8
Расчет	60,42	98,43	62,39	20,62	17,56	22,74
Эксперимент	58,08	108,56	63,046	21,17	18,79	22,8
Расхождение, %	4,04	9,33	1,03	2,57	6,5	0,2

Анализируя данные табл. 10, приходим к выводу, что результаты расчетов удовлетворительно согласуются с результатами измерений, полученных в опытах. При этом расхождение не превышает 10 %, что является хорошим результатом приемлемой погрешности.

Следует отметить, что в течение времени выполнения измерений, так как применялся источник напряжения, изменение напряжения происходило прак-

тически незначительно и им можно пренебречь. Однако, в связи с процессами, проходящими у поверхности электродов (заземлителей) при протекании тока, изменение тока происходило более заметное. Это влияет на результаты, которые приведены в табл. 9 и табл. 4, что необходимо исключить.

Очевидно, этим можно объяснить полученное расхождение результатов расчета и эксперимента. В реальных условиях измерений эти расхождения должны быть существенно меньше. Во всех случаях возможных реальных условий расхождение можно ожидать менее 10 %.

Следует также подчеркнуть, что определение собственных и взаимных сопротивлений заземлителей в качестве начальных значений было выполнено и по результатам измерений в трехэлементной системе (табл. 3). Полученные значения собственных и взаимных сопротивлений заземлителей имеют небольшое отличие от аналогичных значений, полученных для соответствующих пар заземлителей в отсутствие третьего заземлителя (табл. 4). Подстановка этих значений в качестве начальных в программу расчета собственных и взаимных сопротивлений заземлителей дает такой же результат, как и в табл. 10. Этим важным обстоятельством необходимо пользоваться при выполнении натуральных измерений.

Выводы.

Впервые приводится экспериментальное исследование в электролитической ванне НТУ «ХПИ» трехэлектродной установки для измерения сопротивления заземляющих устройств различного назначения.

На основе использования метода физического моделирования представлено экспериментальное обоснование метода измерения сопротивления заземляющего устройства любой конструкции в произвольной структуре грунта.

По результатам моделирования решена система уравнений шестого порядка, что позволило определить собственные и взаимные сопротивления в трехэлектродной установке с достаточно высокой точностью и без отыскания точки нулевого потенциала.

Предложенный метод обеспечивает минимально возможный разнос измерительных электродов за пределами заземляющих устройств. Это в несколько раз уменьшает длину соединительных проводов схемы измерения, увеличивает отношение «сигнал – помехи», снимает ограничения по застройке территории за пределами исследуемого заземляющего устройства.

Полученные результаты показали, что разработанный в [7] метод позволяет получить достаточно точный результат во всех случаях измерений сопротивления заземляющих устройств электроустановок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СОУ 31.2-21677681-19:2009. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. [Чинний від 29.03.2010]. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с.
2. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
3. Ослон А.Б., Коструба С.И. Измерение сопротивлений заземлителей больших размеров // Электричество. – 2006. – №8. – С. 49-56.

4. Ослон А.Б. Анализ методов Тагга при измерениях сопротивления заземления // Третья Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов (27-31 октября 2008 года). – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия. – 2008. – С. 111-120.
5. Ослон А.Б., Целебровский Ю.В. Пересечение потенциальных кривых и сопротивление заземляющего устройства // Третья Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов (27-31 октября 2008 года). – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия. – 2008. – С. 121-130.
6. Ослон А.Б., Коструба С.И. Математическое моделирование процесса измерений сопротивления заземлителя току промышленной частоты в многослойном грунте // Электричество. – 2008. – №5. – С. 12-17.
7. Нижевский И.В. Методика измерения сопротивления заземляющего устройства // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №3. – С. 50-57. doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.08.

REFERENCES

1. SOU 31.2-21677681-19:2009. *Viprobuvannya ta kontrol' pristroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya* [SOU 31.2-21677681-19:2009. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction.]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrainy Publ., 2010. 54 p. (Ukr).
2. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).
3. Oslon A.B., Kostruba S.I. Measuring the resistance of large grounding devices. *Electrichestvo*, 2006, no.8. pp. 49-56. (Rus).
4. Oslon A.B. Tagg methods analysis for measuring grounding resistance. *III Rossiiskaia konferentsiia po zazemliayushchim ustroystvam: Sbornik dokladov* [3rd Russian Conf. on Grounding Devices: Collected Papers]. Novosibirsk, Russia, 27-31 October 2008, pp. 111-120. (Rus).
5. Oslon A.B., Tselebrovskii Iu.V. The intersection of the potential curves and the resistance of the grounding device *III Rossiiskaia konferentsiia po zazemliayushchim ustroystvam: Sbornik dokladov* [3rd Russian Conf. on Grounding Devices: Collected Papers]. Novosibirsk, Russia, 27-31 October 2008, pp. 121-130. (Rus).
6. Oslon A.B., Kostruba S.I. Mathematical modeling of the process of grounding resistance measurement current of industrial frequency in multilayer soil. *Electrichestvo*, 2008, no.5, pp. 12-17. (Rus).

7. Nizhevskiy I.V., Nizhevskiy V.I. A technique of measuring of resistance of a grounding device. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.3, pp. 50-57. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.08.

Поступила (received) 01.09.2016

Нижевский Илья Викторович¹, инженер,
 Нижевский Виктор Ильич¹, доц., к.т.н.,
 Бондаренко Владимир Емельянович¹, проф., д.т.н.,
¹ Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,
 тел/phone +38 057 7076977,
 e-mail: victornizhevski@gmail.com

I.V. Nizhevskiy¹, V.I. Nizhevskiy¹, V.E. Bondarenko¹
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

The experimental validation of the grounding device resistance measurement method.

Purpose. The paper considers experimental research of three-electrode units for measuring the resistance of grounding devices for different purposes. **Methodology.** The experimental study of the method of resistance measurement of grounding devices for any design in any soil structure using the method of physical modeling is presented. **Results.** By results of model operation the set of equations of the sixth order is solved. It allowed to determine the own and mutual impedance in the three-electrode unit with high accuracy without searching the point of zero potential. Features of measuring and defining the own and relative resistances of various combinations of electrodes for three-electrode measuring unit are considered. **Originality.** The necessity of finding a zero potential point is excluded. **Practical value.** The proposed method provides the smallest possible spacing of potential electrodes outside the grounding devices. This reduces the wiring length measurement circuit in several times, increases the ratio «signal – noise», removes the restrictions on building of the territory outside the test grounding device. References 7, tables 10, figures 5.

Key words: experimental research, grounding device, the resistance measurement method, three-electrode unit, the method of physical modeling, experimental validation.