

И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский

МЕТОДИКА НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Розглянуто вимірювання опору заземлювальних пристроїв різного призначення за допомогою трьохелектродної установки в реальних умовах. На основі використання трьохелектродної установки представлено обґрунтування методики вимірювання опору заземлювального пристрою будь якої конструкції в довільній структурі ґрунту. За результатами вимірювань вирішується система рівнянь шостого порядку, що дозволяє визначити власні і взаємні опори в трьохелектродній установці з досить високою точністю і без відшукування точки нульового потенціалу. Бібл. 9, табл. 6, рис. 2.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, опір заземлення, натурні вимірювання, методика, трьохелектродна установка, точка нульового потенціалу, система рівнянь.

Рассмотрены измерения сопротивления заземляющих устройств различного назначения с помощью трехэлектродной установки в реальных условиях. На основе использования трехэлектродной установки представлено обоснование методики измерения сопротивления заземляющего устройства любой конструкции в произвольной структуре грунта. По результатам измерений решается система уравнений шестого порядка, что позволяет определить собственные и взаимные сопротивления в трехэлектродной установке с достаточно высокой точностью и без отыскания точки нулевого потенциала. Библ. 9, табл. 6, рис. 2.

Ключевые слова: заземляющее устройство, сопротивление заземления, натурные измерения, методика, трехэлектродная установка, точка нулевого потенциала, система уравнений.

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 в ряде случаев измерение сопротивления ЗУ городских и промышленных подстанций представляет серьезную проблему и до настоящего времени.

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

Расчетный метод определения оптимального расположения измерительных электродов при измерении сопротивления заземлителей больших размеров с помощью рассматриваемых моделей заземлителей имеет лишь ограниченное применение, связанное с их внешними полями [3].

На основании критического анализа существующих методов определения сопротивления заземления в работе [4] рассмотрен уточненный вариант его определения. Путем введения понятия особой и квазиэквипотенциальной областей заземлителя предложен и экспериментально проверен новый метод измерения его сопротивления. Однако предложенный метод в ряде случаев не позволяет выполнить измерения сопротивления заземляющих устройств с приемлемой точностью.

В работе [5] предложен метод повышенной точности для измерения сопротивления заземления подстанции при присоединении ЛЭП путем измерения тока в заземлении с помощью разработанного специ-

ального беспроводного датчика тока, использующего GPS. Несмотря на то, что опробование метода на действующей подстанции 500 кВ подтвердило его правомерность, в отдельных случаях его применение вызывает много вопросов и требует серьезного и детального анализа.

Принципиальная возможность точного измерения сопротивления заземлителя отмечена в работе [6]. Однако, к сожалению, и в этом случае необходимо будет определять местоположение потенциального электрода путем многократного отыскания точки нулевого потенциала на месте измерений.

Математическое моделирование процесса измерений сопротивления заземлителя току промышленной частоты в многослойном грунте показало [7], что выбрать такое расположение электродов, при котором измеренное сопротивление заземлителя равняется истинному, экспериментальным путем при измерениях на местности невозможно.

В работе [8] приводится теоретическое, а на основе использования метода физического моделирования в работе [9] представлено экспериментальное 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 разработка методики натуральных измерений сопротивления заземлителя с помощью трехэлектродной измерительной установки без отыскания точки нулевого потенциала.

Рекомендуемая методика натуральных измерений в группе заземлителей и обработки результатов измерений для получения величин собственных и взаимных сопротивлений в трехэлементной системе. Подготовка и проведение измерений электрических параметров ЗУ действующих подстанций

© И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский

классом напряжения выше 1 кВ должны исключать опасные ситуации, которые могут при этом возникнуть. Например, в условиях промышленной или городской застройки вынос электродов на большие расстояния связан с возможностью выноса потенциалов, что представляет серьезную опасность.

Провода и кабели, соединяющие источник электроэнергии, приборы, заземлители, обычно имеют значительную длину, особенно при больших размерах испытываемого заземлителя. При этом необходимо соблюдать два правила [2]:

а) соединительные линии недопустимо прокладывать параллельно или под небольшим острым углом к трассе воздушных линий (ВЛ). Положение электродов (заземлителей), кроме испытываемого, должно быть выбрано так, чтобы соединительные линии были расположены по отношению к трассе ВЛ либо под углом, близким к прямому, либо в направлении, противоположном трассе ВЛ, подходящей к подстанции (последнее относится лишь к тупиковым подстанциям).

б) вначале монтируют токовый заземлитель и потенциальный электрод и присоединяют к ним соединительные провода. Затем их начинают раскладывать и подключают к испытываемому.

По окончании работ измерительную схему разбирают в обратной последовательности. Вначале отключают соединительные провода от испытываемого ЗУ и от приборов, затем провода сматывают и лишь в конце отсоединяют от токового и потенциального электродов.

В связи с изложенным, методика натурных измерений в группе заземлителей заключается в следующем.

На рис. 1 приведена в плане схема для осуществления способа измерения сопротивления отдельных взаимовлияющих заземлителей в последовательности операций.

В исходном состоянии используют систему трех независимых (проверяется отсутствие гальванической связи) заземлителей 1, 2, 3, каждый из которых имеет свое значение R_{xi} , где $i = 1, 2, 3$. Один из заземлителей может быть заданным для измерения его сопротивления, другие либо уже существуют, либо создаются дополнительно. В общем случае измерений заземлители 1, 2 и 3 расположены в земле (грунте).

Ниже рассмотрена система из трех взаимовлияющих заземлителей в виде круглых пластин диаметром 4 м, 2 м и 3,6 м. Пластины изготовлены из покрытого утолщенной фольгой пенопласта и размещены на поверхности водоема (30×20 м) с удельным сопротивлением воды $\rho = 12$ Ом·м при расстояниях между ними 0,4 м. Вначале выполнено измерение сопротивлений заземлителей по однолучевой схеме [1], т.е. по существующей методике (значения см. в табл. 6). Измерения выполнены ранней весной.

По новой методике производят серию измерений в опытах А (рис. 1,а), В (рис. 1,б) и С (рис. 1,в).

Собирают схему цепи для измерений: вольтметр 8 с помощью проводов 7 подключают к паре заземлителей (1-2), вольтметр 10 с помощью проводов 9 подключают к паре заземлителей (2-3), вольтметр 12 с помощью проводов 11 подключают к паре заземлите-

лей (1-3). Источник 6 контролируемого амперметром 5 тока с помощью проводов 4 подключают к паре заземлителей (1-2) и обеспечивают протекание тока по цепи (рис. 1,а). Фиксируют показания амперметра 5 (I_{1-2}), вольтметра 8 (U_{1-2}), вольтметра 10 (U_{2-3}), вольтметра 12 (U_{1-3}). От заземлителя 2 отключают провод 4, перемещают его к заземлителю 3 и подключают к нему. Обеспечивают протекание тока по цепи (рис. 1,б). Фиксируют показания амперметра 5 (I_{1-3}), вольтметра 8 (U_{1-2}), вольтметра 10 (U_{2-3}), вольтметра 12 (U_{1-3}). От заземлителя 1 отключают провод 4, перемещают его к заземлителю 2 и подключают к нему. Обеспечивают протекание тока по цепи (рис. 1,в). Фиксируют показания амперметра 5 (I_{2-3}), вольтметра 8 (U_{1-2}), вольтметра 10 (U_{2-3}), вольтметра 12 (U_{1-3}).

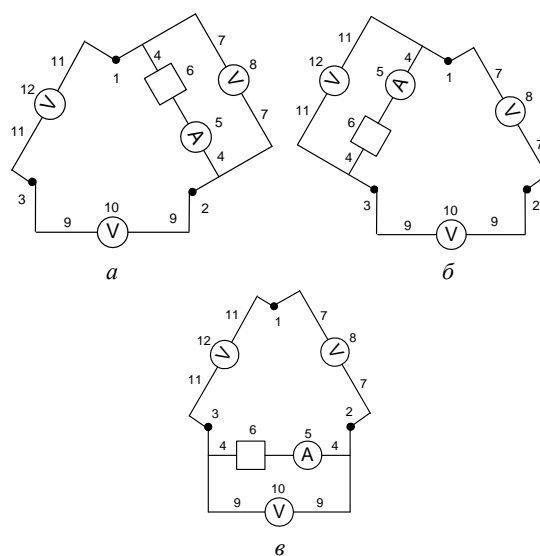


Рис. 1. Схематическое расположение заземлителей и подключение приборов для измерений

В результате измерений получаем значения параметров, которые заносим в табл. 1.

Таблица 1
Результаты натурных измерений параметров

| Опыт | А | В | С |
|---------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Измеряемый параметр | Ввод источника в точки 1 и 2 | Ввод источника в точки 1 и 3 | Ввод источника в точки 2 и 3 |
| I_{12} , А | 112,64 | — | — |
| I_{13} , А | — | 165,76 | — |
| I_{23} , А | — | — | 112,16 |
| U_{12} , В | 379,9 | 169,41 | 243,275 |
| U_{13} , В | 128,296 | 351,4 | 124,273 |
| U_{23} , В | 251,638 | 182 | 367,5 |

Обработка приведенных в табл. 1 данных позволяет получить входные сопротивления для каждой пары заземлителей в системе трех взаимовлияющих заземлителей. Входное сопротивление при вводе источника между заземлителями, например 1 и 2, определяем по выражению

$$R_{12\text{inp}} = U_{12} / I_{12}.$$

Аналогично получаем значения входных сопротивлений $R_{13\text{inp}}$ и $R_{23\text{inp}}$. Результаты сводим в табл. 2.

Таблица 2
Входные сопротивления для соответствующих пар заземлителей

| Определяемый параметр | Входные сопротивления между заземлителями, Ом | | |
|-----------------------|---|-------------|-------------|
| | R_{12inp} | R_{13inp} | R_{23inp} |
| Значение параметра | 3,37 | 2,11 | 3,27 |

По результатам табл. 2 с учетом рис. 2 составляем систему трех уравнений с шестью неизвестными величинами трехэлементной системы заземлителей:

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

Пренебрегая (допущение) взаимными сопротивлениями (R_{12} , R_{13} и R_{23}) и влиянием третьего заземлителя в пределах каждой пары, путем решения полученной таким образом системы трех уравнений с тремя неизвестными, рассчитываем приближенные значения собственных сопротивлений заземлителей (R_{10} , R_{20} и R_{30}), которые сводим в табл. 3.

Таблица 3
Приближенные значения собственных сопротивлений заземлителей

| Определяемый параметр | Собственные сопротивления, Ом | | |
|-----------------------|-------------------------------|----------|----------|
| | R_{10} | R_{20} | R_{30} |
| Значение параметра | 1,11 | 2,26 | 1 |

Полученные приближенные значения собственных сопротивлений заземлителей позволяют оценить приближенные значения взаимных сопротивлений между заземлителями в пределах каждой пары. Такая оценка основывается на том, что взаимное сопротивление между двумя заземлителями всегда меньше наименьшего из них. Результаты расчетов сводим в табл. 4.

Таблица 4
Оценка взаимных сопротивлений между соответствующими парами заземлителей

| Определяемый параметр | Взаимные сопротивления между заземлителями, Ом | | |
|-----------------------|--|-------------|-------------|
| | R_{12mut} | R_{13mut} | R_{23mut} |
| Значение параметра | 1 | 0,8 | 1 |

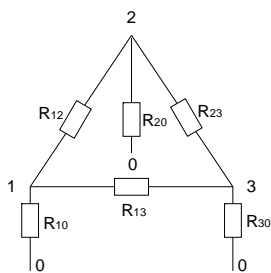


Рис. 2. Схема замещения системы трех взаимовлияющих заземлителей

По данным измерений (табл. 1) величин токов (I_{12} , I_{13} , I_{23}) и напряжений (U_{12} , U_{13} , U_{23}), полученных при каждом измерении тока, составляем систему шести уравнений с шестью неизвестными, представляющими схему замещения (рис. 2) системы трех взаимовлияющих заземлителей. Система имеет следующий вид:

$$\begin{cases} R_{(1-3)A} = \left[(R_1 - R_{12}) - \frac{(R_{13} - R_{32})R_{13}}{R_3} \right] - (R_{13} - R_{32}); \\ R_{(3-2)A} = \left[(R_2 - R_{12}) + \frac{(R_{13} - R_{32})R_{32}}{R_3} \right] + (R_{32} - R_{13}); \\ R_{(1-2)B} = \left[(R_1 - R_{13}) - \frac{(R_{23} - R_{12})R_{12}}{R_2} \right] - (R_{23} - R_{12}); \\ R_{(3-2)B} = \left[(R_3 - R_{13}) + \frac{(R_{23} - R_{12})R_{23}}{R_2} \right] - (R_{23} - R_{12}); \\ R_{(1-2)C} = \left[(R_2 - R_{32}) + \frac{(R_{13} - R_{12})R_{12}}{R_1} \right] + (R_{12} - R_{13}); \\ R_{(1-3)C} = \left[(R_3 - R_{32}) - \frac{(R_{13} - R_{12})R_{13}}{R_1} \right] + (R_{12} - R_{13}). \end{cases} \quad (2)$$

Полученные приближенные значения параметров схемы (см. табл. 3 и табл. 4), в соответствии с методикой, изложенной в работе [8], используем в качестве начальных значений для решения системы шести уравнений с шестью неизвестными (2), у которых левые части представлены на основе измерений, приведенных в табл. 1, следующим образом.

Например, в опыте А результаты измерений напряжений U_{13} и U_{23} и тока I_{12} при вводе источника между заземлителями 1 и 2 позволяют получить входные сопротивления, т.е. левые части системы уравнений (2):

$$\begin{aligned} R_{13A} &= U_{13} / I_{12}; \\ R_{32A} &= U_{23} / I_{12}. \end{aligned}$$

Результаты аналогичных расчетов при вводе источника между заземлителями 1 и 3 (опыт В), а также заземлителями 2 и 3 (опыт С) сводим в табл. 5.

Таблица 5
Результаты оценки левых частей уравнений при вводе источника между соответствующими заземлителями

| Подключение источника | Точки 1 и 2 | | Точки 1 и 3 | | Точки 2 и 3 | |
|------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | R_{13A} | R_{32A} | R_{12B} | R_{32B} | R_{12C} | R_{13C} |
| Значение параметра, Ом | 1,139 | 2,234 | 1,022 | 1,098 | 2,169 | 1,108 |

Используя в качестве начальных приближенные значения собственных (табл. 3) и взаимных (табл. 4) сопротивлений заземлителей и подставляя полученные левые части (табл. 5) в уравнения (2), решаем систему уравнений с помощью разработанной в пакете Mathcad программы и результаты сводим в табл. 6.

Таблица 6
Результаты измерений собственных и взаимных сопротивлений заземлителей по новой и существующей методикам и оценка расхождений

| Параметр, Ом | R_1 | R_2 | R_3 | R_{12} | R_{13} | R_{23} |
|--------------------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| Начальное значение | 1,11 | 2,26 | 1 | 1 | 0,8 | 1 |
| По новой методике | 1,534 | 2,694 | 1,594 | 0,525 | 0,464 | 0,565 |
| По существующей | 1,5 | 2,7 | 1,6 | 0,53 | 0,47 | 0,57 |
| Расхождение, % | 2,26 | 0,22 | 0,37 | 0,94 | 1,27 | 0,87 |

Анализируя данные табл. 6, приходим к выводу, что результаты расчетов удовлетворительно согласу-

ются с результатами измерений, полученных в опытах. При этом расхождение не превышает 2,3 %, что является очень хорошим результатом погрешности.

Таким образом, получаем искомые величины собственных и взаимных сопротивлений заземлителей, составляющих трехэлементную систему.

Выводы.

Впервые приводится методика натуральных измерений сопротивления заземляющих устройств различного назначения с помощью трехэлектродной установки без отыскания точки нулевого потенциала.

Предложенная методика обеспечивает минимально возможный разнос измерительных электродов за пределами ЗУ, что снимает ограничения по застройке территории за пределами исследуемого заземляющего устройства, в несколько раз уменьшает длину соединительных проводов схемы измерения, что увеличивает отношение «сигнал – помехи».

Экспериментальные натурные измерения показали, что разработанная методика позволяет получить достаточно точный результат во всех случаях измерений сопротивления ЗУ электроустановок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. 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. Чернов К.П. Сопротивление заземлителя и метод его определения с помощью двух дополнительных заземлителей с неизвестными сопротивлениями // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2012. – №5-6. – С. 55-61.
5. Yue Yong-gang, Huang Zhi, Dang Da-wei, Meng Qing-da, Wang Ya-ping, Huo Feng, Ye Tao. Grounding impedance measurement for 500 kV substation with lightning line // *Journal of Electric Power Science and Technology*. – 2013. – №4. – pp. 83-87.
6. 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.
7. Ослон А.Б., Коструба С.И. Математическое моделирование процесса измерений сопротивления заземлителя току промышленной частоты в многослойном грунте // *Электричество*. – 2008. – №5. – С. 12-17.
8. Нижевский И.В., Нижевский В.И. Методика измерения сопротивления заземляющего устройства // *Электротехника і електромеханіка*. – 2016. – №3. – С. 50-57. doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.08.
9. Нижевский И.В., Нижевский В.И., Бондаренко В.Е. Экспериментальное обоснование метода измерения сопротивления заземляющего устройства // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – №6. – С. 60-64. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.10.

REFERENCES

1. *Natsional'nyy standart Ukrayiny. SOU 31.2-21677681-19:2009. Viprobuvannya ta kontrol' prystroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruksiya* [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).

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. Chernov K.P. Resistance of grounding conductor and method of its determination with the help of two additional earth leads with unknown resistances. *Proceedings of higher educational establishments. Energy problems*. 2012, no.5-6, pp. 55-61. (Rus).
5. Yue Yong-gang, Huang Zhi, Dang Da-wei, Meng Qing-da, Wang Ya-ping, Huo Feng, Ye Tao. Grounding impedance measurement for 500 kV substation with lightning line. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2013, iss.4, pp. 83-87. (Chinese).
6. 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).
7. 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).
8. 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.
9. Nizhevskiy I.V., Nizhevskiy V.I., Bondarenko V.E. The experimental validation of the grounding device resistance measurement method. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.6, pp. 60-64 (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.10.

Поступила (received) 01.02.2018

Нижевский Илья Викторович¹, к.т.н.,
Нижевский Виктор Ильич¹, к.т.н., доц.,
¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичова, 2,
тел/phone +380 57 7076977,
e-mail: victornizhevski@gmail.com

I.V. Nizhevskiy¹, V.I. Nizhevskiy¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

A technique of full-scale measurements of the resistance of the grounding device.

Purpose. The measurements of the resistance of grounding devices for various purposes using a three-electrode installation under real conditions are considered. **Methodology.** On the basis of the use of a three-electrode installation, a technique for full-scale measurements of the resistance of a grounding device of any design in an arbitrary soil structure is presented. **Results.** Based on the measurement results, a system of sixth-order equations is solved which allows to determine the own and mutual resistances in a three-electrode installation with a sufficiently high accuracy. **Originality.** It is not necessary to find a point of zero potential. **Practical value.** The proposed technique allows to perform measurements in conditions of dense urban and industrial development. References 9, tables 6, figures 2.

Key words: grounding device, grounding resistance, full-scale measurements, technique, three-electrode installation, zero potential point, system of equations.