

И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

*Розглянуто трьохелектродна установка для вимірювання опору заземлюючих пристроїв (ЗП) різного призначення. На основі використання системи рівнянь Максвелла запропоновано теоретичне обґрунтування методики вимірювання опору ЗП будь-якої конструкції в довільній структурі ґрунту. Отримано систему рівнянь шостого порядку, рішення якої дозволяє визначити власні і взаємні опори в трьохелектродній установці з досить високою точністю. Розглянуто особливості складання розрахункової схеми заміщення трьохелектродної вимірювальної установки з зосередженими параметрами: власними та взаємними опорами. Використовуючи принцип взаємності, виключена необхідність відшукування точки нульового потенціалу, що представляє вісьма трудомістке завдання. Методика дозволяє забезпечити мінімально можливий рознос вимірювальних електродів за межами ЗП, що істотно зменшує довжину сполучних проводів схеми вимірювання і збільшує відношення «сигнал-перешкоди», а також знімає обмеження щодо забудови території за межами досліджуваного ЗП. Бібл. 12, табл. 2, рис. 11.*

*Ключові слова:* заземлюючий пристрій, вимірювання опору, трьохелектродна установка, мінімальний рознос вимірювальних електродів, методика, схема заміщення.

*Рассмотрена трехэлектродная установка для измерения сопротивления заземляющих устройств (ЗУ) различного назначения. На основе использования системы уравнений Максвелла предложено теоретическое обоснование методики измерения сопротивления ЗУ любой конструкции в произвольной структуре грунта. Получена система уравнений шестого порядка, решение которой позволяет определить собственные и взаимные сопротивления в трехэлектродной установке с достаточно высокой точностью. Рассмотрены особенности составления расчетной схемы замещения трехэлектродной измерительной установки с сосредоточенными параметрами: собственными и взаимными сопротивлениями. Используя принцип взаимности, исключена необходимость отыскания точки нулевого потенциала, представляющего весьма трудоемкую задачу. Методика позволяет обеспечить минимально возможный разнос измерительных электродов за пределами ЗУ, что существенно уменьшает длину соединительных проводов схемы измерения и увеличивает отношение «сигнал-помехи», а также снимает ограничения по застройке территории за пределами исследуемого ЗУ. Библ. 12, табл. 2, рис. 11.*

*Ключевые слова:* заземляющее устройство, измерение сопротивления, трехэлектродная установка, минимальный разнос измерительных электродов, методика, схема замещения.

**Введение.** Проблемам измерения электрических параметров земли и заземляющих устройств (ЗУ) посвящены фундаментальные работы известных ученых: А.Л. Вайнер [1], С.И. Коструба [2], А.Б. Ослон [3], Ю.В. Целебровский [4], А.И. Якобс [5] и др. В своих работах и отечественные и зарубежные исследователи отмечают, что одной из важных проблем является проблема точного измерения сопротивления ЗУ различного назначения.

В настоящее время для измерений сопротивлений ЗУ получила широкое распространение трехэлектродная измерительная установка. Одной из главных задач, которую необходимо решить для получения с помощью этой установки достаточно точных результатов, является, как указано в работе [6], 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 некоторую величину, которую принято называть приемлемой погрешностью измерения. Обычно считается, что при измерениях сопротивлений ЗУ приемлемой является погрешность порядка 10 % в ту или иную сторону [5].

Измерение сопротивлений заземлителей больших размеров в однородном грунте представлено в работе [6], в которой описан расчетный метод определения оптимального расположения измерительных электродов при измерении сопротивления заземлителей больших размеров, позволяющий размещать электроды на близких расстояниях от заземлителя.

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 [7], показал, что метод Тагга не пригоден в грунтах с возрастанием удельного сопротивления грунта по глубине.

Вместе с тем, в выводах работы [8] отмечено, что существует принципиальная возможность точного измерения сопротивления заземлителя при любом характере неоднородности грунта и любых размерах и конфигурации ЗУ, без использования расчетных программ, где также показаны пути реализации этой возможности. 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 току промышленной частоты в многослойном грунте представлено в работе [9], где описан алгоритм вычисления погрешностей измерения сопротивлений заземлителей электроустановок в многослойных грунтах при различных расположениях измерительных электродов и приведен пример построения линий равных погрешностей для заземлителя сложной формы в четырехслойном грунте. К сожалению, как отмечают авторы [9], выбрать такое расположение электродов, при котором

измеренное сопротивление заземлителя равняется истинному, экспериментальным путем при измерениях на местности невозможно.

**Целью работы** является теоретическое обоснование методики измерения сопротивления заземлителя с помощью трехэлектродной измерительной установки при любом характере неоднородности грунта, любых размерах и конфигурации ЗУ и произвольном размещении измерительных электродов.

**Теоретическое обоснование разработанной методики измерения сопротивления ЗУ.** Трехэлектродная установка для измерения сопротивления ЗУ различного назначения в общем случае является многоэлектродной системой. А расчет многоэлектродных систем в линейной проводящей среде любого строения, как отмечено в работе [9], основывается на системе уравнений, предложенных Максвеллом [10].

В связи с этим рассмотрим сначала пример использования расчетной схемы замещения при размещении пассивного заземлителя в поле тока активного заземлителя. На рис. 1 показаны элементы схемы замещения:  $R_1$  – активный заземлитель,  $R_2$  – пассивный заземлитель,  $R_{12}$  – взаимное сопротивление.

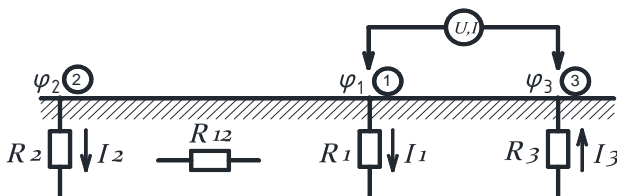


Рис. 1. Взаимовлияние активного (1) и пассивного (2) заземлителей

Допускаем, что источник тока  $I_1$  имеет второй полюс ( $R_3$ ), располагаемый так, что его поле не влияет на поле в точке 2. Потенциал в точке 2 ( $\varphi_2$ ) определяется как  $I_1 \cdot R_{12}$ , тогда с пассивного электрода  $R_2$  стекает в землю ток  $I_2$ . Источник (тока) подгружается дополнительным током  $I_2$ ; если источник определен как «источник тока», потенциал точки 1 ( $\varphi_1$ ) снижается. В случае «источника напряжения» нагрузка источника увеличивается за счёт суммирования токов  $I_1$  и  $I_2$ . Наличие двух токов ( $I_1$  и  $I_2$ ) позволяет использовать известную уже систему уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \varphi_1 = I_1 R_1 + I_2 R_{12}; \\ \varphi_2 = I_1 R_{12} + I_2 R_2. \end{cases} \quad (1)$$

Отметим известные ограничения при определении (экспериментальном) взаимного сопротивления: из опыта с двумя заземлителями сопротивление  $R_{12}$  неопределимо. Желание определить все три сопротивления реализуется при работе с системой из трёх взаимовлияющих заземлителей.

Уравнения Максвелла определяют полевые потенциальные связи, тогда как для упрощения расчётов удобнее использовать схемы замещения с некоторыми ( $\varphi, I, R$ ) параметрами.

На примере двух заземлителей, обтекаемых одинаковым током от источника ( $U, I$ ) в последовательной цепи (рис. 2), рассмотрим варианты схемы замещения.

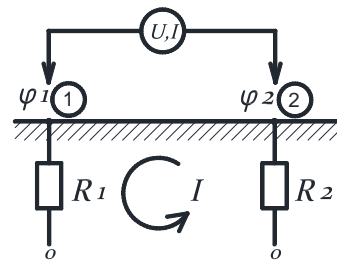


Рис. 2. Система двух заземлителей при их последовательном включении

Следуя электростатической аналогии и уравнениям Максвелла, имеем

$$\begin{cases} \varphi_1 = IR_1 - IR_{12}; \\ \varphi_2 = -IR_{12} + IR_2. \end{cases} \quad (2)$$

На основании уравнений (2) можем записать

$$\begin{aligned} \varphi_1 + \varphi_2 = U = I(R_1 - R_{12} + R_2 - R_{12}) = \\ = I(R_1 + R_2 - 2R_{12}) = IR_{equ}. \end{aligned} \quad (3)$$

Соответствующая уравнению (3) схема замещения получает вид (рис. 3).

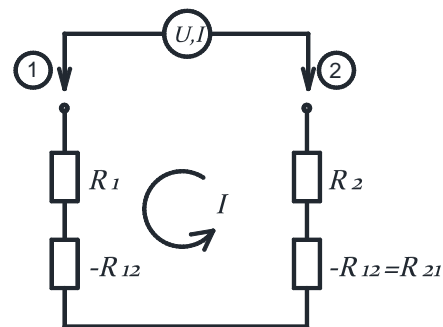


Рис. 3. Вариант схемы замещения для последовательно соединённых заземлителей

Схема, приведенная на рис. 3, пригодна для математического моделирования, но не для модели физической из-за наличия отрицательных сопротивлений  $R_{12}$ . Физический аналог для схемы на рис. 3 представим в виде схемы по рис. 4.

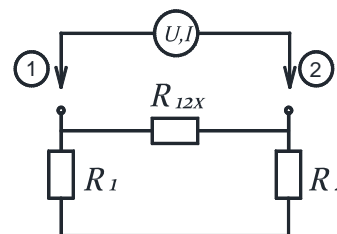


Рис. 4. Расчётный аналог схемы замещения

По равенству входных сопротивлений схем рис. 3 и рис. 4 имеем:

$$R_1 + R_2 - 2R_{12} = \frac{(R_1 + R_2)R_{12X}}{R_1 + R_2 + R_{12X}}. \quad (4)$$

После компоновки слагаемых получим

$$2R_{12X}R_{12} = (R_1 + R_2)^2 - 2R_{12}(R_1 + R_2), \quad (5)$$

а отсюда находим

$$R_{12X} = \frac{(R_1 + R_2)^2}{2R_{12}} - R_1 - R_2, \quad (6)$$

или получаем связь между сопротивлениями  $R_{12}$  (см. формулу (5)) и  $R_{12X}$ :

$$R_{12} = \frac{(R_1 + R_2)^2}{2(R_1 + R_2 + R_{12X})}. \quad (7)$$

Учтём, что взаимное сопротивление  $R_{12}$  меньше меньшего из сопротивлений  $R_1$  или  $R_2$  и  $R_{12X} > 0$ .

Использование модели по рис. 4 при расчётах для нахождения величины  $R_{12X}$  с учётом выражения (7) даёт возможность определения взаимного сопротивления  $R_{12}$ ; учёт влияния  $R_{12}$  (с соответствующим знаком) должен выполняться согласно рис. 3.

Измерения при двух заземлителях (см. рис. 2) путём ввода источника ( $U, I$ ) не позволяют расшифровать значения сопротивлений  $R_1, R_2$  и  $R_{12}$ , а также потенциалов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Вводим в рассмотрение третий электрод в точку 3, как показано на рис. 5, и рассмотрим три опыта: *A, B* и *C*.

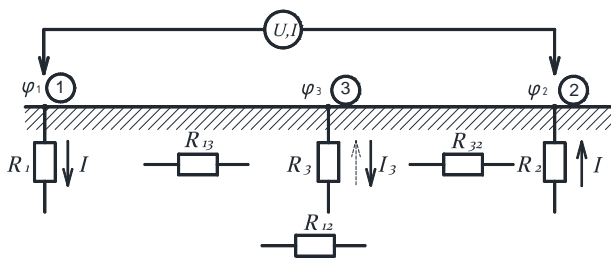


Рис. 5. Трехэлементная система заземлителей, опыт *A*

В опыте *A* активные электроды 1 и 2, обтекаемые общим током  $I$  от источника, создают потенциальное поле для пассивного электрода 3, которое определяет потенциал последнего:

$$\varphi_3 = R_{13}I - R_{32}I = I(R_{13} - R_{32}) = IR_{3E}. \quad (8)$$

Появляются напряжения  $U_{13}$  и  $U_{32}$ . Например, при  $U_{32} < U_{13}$  и влияние электрода 2 на формирование  $\varphi_3$  больше по сравнению с электродом 1. Под действием  $\varphi_3$  в электроде 3 протекает ток  $I_3 = \varphi_3/R_3$ . В случае  $U_{32} < U_{13}$  ток  $I_3$  совпадает по направлению с током в сопротивлении  $R_2$ ; направление тока  $I$  в электроде 1 принято положительным, а в электроде 2 – отрицательным.

Появление тока  $I_3$  следует учесть для активных электродов 1 и 2 через соответствующие взаимные сопротивления в уравнениях Максвелла. С учётом выражения (8) для активного электрода 1 появляется слагаемое

$$-I_3R_{13} = -I \frac{(R_{13} - R_{32})}{R_3} R_{13},$$

и потенциал для электрода 1 определяется как

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= R_1I - R_{12}I - I \frac{(R_{13} - R_{32})}{R_3} R_{13} = \\ &= I \left[ R_1 - R_{12} - \frac{(R_{13} - R_{32})R_{13}}{R_3} \right] = IR_{1E}. \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогично получаем потенциал и для активного электрода 2:

$$\varphi_2 = I \left[ R_2 - R_{12} + \frac{(R_{13} - R_{32})R_{32}}{R_3} \right] = IR_{2E}. \quad (10)$$

Потенциалы  $\varphi_1, \varphi_2$  и  $\varphi_3$ , согласно уравнениям (8), (9) и (10), выражены через ток источника  $I$  и величины резисторов (собственные  $R_s$  ( $R_1, R_2$  и  $R_3$ ) и взаимные  $R_{12}$  ( $R_{12} = R_{21}, R_{13} = R_{31}$  и  $R_{23} = R_{32}$ )).

Измерение напряжений между пассивным 3 и активными 1 и 2 электродами соответственно определяет

$$U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3;$$

$$U_{32} = \varphi_3 - \varphi_2.$$

Следовательно,

$$U_{13} = I(R_{1E} - R_{3E}) \quad \text{и} \quad \frac{U_{13}}{I} = R_{1E} - R_{3E}, \quad (11)$$

$$U_{32} = I(R_{3E} - R_{2E}) \quad \text{и} \quad \frac{U_{32}}{I} = R_{3E} - R_{2E}. \quad (12)$$

Измерение напряжений  $U_{13}, U_{32}$  при токе  $I$  определяет левые части двух уравнений связи с шестью резисторами согласно (11) и (12).

Следующие два уравнения получаем при измерении с вводом тока между точками 1 и 3. В этом случае рассматриваем согласно рис. 6, опыт *B*.

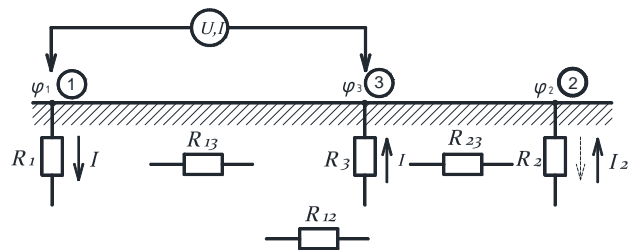


Рис. 6. Подключение источника ( $U, I$ ) в опыте *B*

Напряжение  $U$  и ток  $I$  «свои» для данного опыта, т.е. отличны от величин в опыте *A*. Измерение напряжений  $U_{32}$  и  $U_{12}$  позволяет определить, например,  $U_{32} < U_{12}$  и тогда полагать ток в сопротивлении  $R_2$  совпадающим по направлению с током в сопротивлении  $R_3$ .

Для пассивного электрода 2 имеем потенциал

$$\varphi_2 = I(R_{23} - R_{12}) = IR_{2E},$$

и стекающий с него ток

$$I_2 = I \frac{(R_{23} - R_{12})}{R_2}.$$

Для активного электрода 1 потенциал определяем по выражению

$$\varphi_1 = I \left[ R_1 - R_{13} - \frac{(R_{23} - R_{12})R_{12}}{R_2} \right] = IR_{1E}.$$

С учётом взаимовлияний для активного электрода 3 имеем потенциал

$$\varphi_3 = I \left[ R_3 - R_{13} + \frac{(R_{23} - R_{12})R_{23}}{R_2} \right] = IR_{3E}.$$

В результате получаем доступные для измерений напряжения

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = I(R_{1E} - R_{2E}) \quad \text{или} \quad \frac{U_{12}}{I} = (R_{1E} - R_{2E}) \quad (13)$$

и напряжения

$$U_{32} = \varphi_3 - \varphi_2 = I(R_{3E} - R_{2E}) \quad \text{или} \quad \frac{U_{32}}{I} = (R_{3E} - R_{2E}). \quad (14)$$

В опыте *C* источник ( $U, I$ ) включен между точками 3 и 2, как показано на рис. 7.

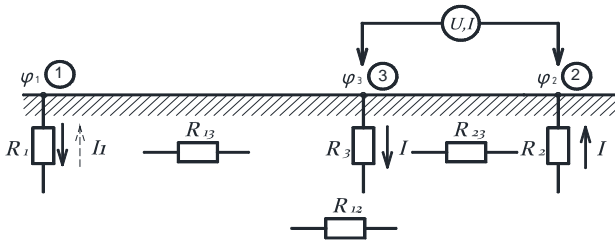


Рис. 7. Подключение источника  $(U, I)$  в опыте С

Измерение напряжений  $U_{13}$  и  $U_{12}$  позволяет в случае, например,  $U_{13} > U_{12}$  полагать потенциал  $\varphi_1$  ближе к потенциалу  $\varphi_2$  и токи для точек 1 и 2 совпадают по направлению.

Выразим потенциал пассивного электрода 1:

$$\varphi_1 = -IR_{12} + IR_{13} = I(R_{13} - R_{12}) = IR_{E1}.$$

Ток  $I_1$  в сопротивлении  $R_1$  определяем по формуле:

$$I_1 = I \frac{(R_{13} - R_{12})}{R_1}.$$

Потенциалы активных электродов 3 и 2 определяются соответственно по формулам:

$$\varphi_3 = I \left( R_3 - R_{32} - \frac{(R_{13} - R_{12})}{R_1} R_{13} \right) = IR_{E3}$$

и

$$\varphi_2 = I \left( R_2 - R_{32} + \frac{(R_{13} - R_{12})}{R_1} R_{12} \right) = IR_{E2}.$$

Поскольку в данном опыте измеряем напряжения

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = I(R_{E1} - R_{E2})$$

и

$$U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3 = I(R_{E1} - R_{E3}),$$

то в итоге получаем еще два уравнения:

$$\frac{U_{12}}{I} = (R_{E1} - R_{E2}) \quad (15)$$

и

$$\frac{U_{13}}{I} = (R_{E1} - R_{E3}). \quad (16)$$

Таким образом, выполненное выше рассмотрение определяет объем экспериментов (измерений) в трех опытах (А, В, С).

Ввод источника  $(U, I)$  в точки 1 и 2 (опыт А) и измерение напряжений  $U_{13A}$  и  $U_{32A}$  при токе  $I_A$ , дает возможность рассчитать входные сопротивления

$$\frac{U_{13A}}{I_A} = R_{(1-3)A}$$

и

$$\frac{U_{32A}}{I_A} = R_{(3-2)A}.$$

Такие сопротивления есть левые части уравнений:

- из уравнений (8), (9) и (11) получаем

$$R_{(1-3)A} = \left[ (R_1 - R_{12}) - \frac{(R_{13} - R_{32})R_{13}}{R_3} \right] - (R_{13} - R_{32}), \quad (17)$$

- из уравнений (8), (10) и (12):

$$R_{(3-2)A} = \left[ (R_2 - R_{12}) + \frac{(R_{13} - R_{32})R_{32}}{R_3} \right] + (R_{32} - R_{13}). \quad (18)$$

Опыт В, ввод источника  $(U, I)$  в точки 1 и 3 и измерение напряжений  $U_{32B}$  и  $U_{12B}$  при токе  $I_B$ .

С учетом определенного выше (выражения (13) и (14)) получаем

$$R_{(1-2)B} = \frac{U_{12B}}{I_B} = \left[ (R_1 - R_{13}) - \frac{(R_{23} - R_{12})R_{12}}{R_2} \right] - (R_{23} - R_{12}); \quad (19)$$

$$R_{(3-2)B} = \frac{U_{32B}}{I_B} = \left[ (R_3 - R_{13}) + \frac{(R_{23} - R_{12})R_{23}}{R_2} \right] - (R_{23} - R_{12}). \quad (20)$$

Опыт С, ввод источника  $(U, I)$  в точки 3 и 2, измерение напряжений  $U_{13C}$  и  $U_{12C}$  при токе  $I_C$ .

С учетом выражения (15) получаем

$$\frac{U_{12C}}{I_C} = (R_{12} - R_{13}) + \left[ R_2 - R_{32} + \frac{(R_{13} - R_{12})R_{12}}{R_1} \right] = R_{(1-2)C}, \quad (21)$$

а из выражения (16) имеем

$$\frac{U_{13C}}{I_C} = (R_{12} - R_{13}) + \left[ R_3 - R_{32} - \frac{(R_{13} - R_{12})R_{13}}{R_1} \right] = R_{(1-3)C}. \quad (22)$$

В итоге получаем систему шести уравнений (17) – (22) с шестью неизвестными ( $R_1, R_2, R_3, R_{12}, R_{13}, R_{23}$ ) при известных по измерениям значениях сопротивлений  $R_{(1-3)A}, R_{(3-2)A}, R_{(1-2)B}, R_{(3-2)B}, R_{(1-2)C}, R_{(1-3)C}$ .

Решение полученной системы шести уравнений с шестью неизвестными выполнено с помощью программы, реализованной в пакете Mathcad.

**Некоторые особенности измерения сопротивления ЗУ.** К изложенной выше методике полезно также отметить следующее. В случае применения метода с электродом нулевого потенциала  $\varphi_p$ , например, в линейной схеме «объект с  $R_g$  – токовый электрод  $R_c$ » и экспериментально определенное местоположение потенциального электрода  $R_p$  для последнего добиваются выполнения условия

$$\varphi_p = 0 = \alpha_{gp}I - \alpha_{cp}I \quad (23)$$

при последовательном соединении  $R_g$  и  $R_c$  с источником  $(U, I)$  – см. рис. 2.

В общем случае потенциал  $\varphi_p$  по уравнению (23) не равен нулю, но существуют потенциалы от тока  $I$  в электродах  $R_g$  и  $R_c$ . Тогда в случае наличия некоторой проводимости (на землю) потенциального электрода с него при  $\varphi_p \neq 0$  стекает ток  $I_p$  и между электродами в схеме выделяются напряжения:

$$\begin{cases} \varphi_g - \varphi_p = U_{g-p}; \\ \varphi_c - \varphi_p = U_{c-p}, \end{cases} \quad (24)$$

в соответствии с выражением

$$\varphi_p = \alpha_{gp}I - \alpha_{cp}I + \alpha_{pp}I_p = U_{g-p} - U_{c-p} + U_p, \quad (25)$$

где  $\alpha_{pp}$  – собственный потенциальный коэффициент заземлителя потенциального электрода.

Напряжения  $U_{g-p}$  и  $U_{c-p}$  могут быть измерены при условии пренебрежимо малого влияния проводимости

измерительной цепи на токораспределение в исследуемой системе (электроды  $R_g$ ,  $R_p$  и  $R_c$ ).

При известном токе  $I$  и измеренном напряжении  $U_{g-p}$  по выражению

$$U_{g-p} = \alpha_{gp} I \quad (26)$$

оцениваем величину  $\alpha_{gp}$ .

В рассматриваемой системе трех заземлителей (рис. 5) аналогичные расчёты типа (26) позволяют определить (по обозначениям рис. 5) сопротивления взаимные  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{23}$ .

Известные теперь величины взаимных сопротивлений позволяют рассматривать для определения собственных сопротивлений три уравнения, например, (17) – (19) или другую комбинацию указанных уравнений, образующих после введения взаимных сопротивлений систему уравнений шестого порядка.

Рассмотренный выше подход к определению собственных и взаимных сопротивлений для случая трех заземлителей основан на использовании естественных взаимовлияний элементов конкретной группы заземлителей. Большие возможности для исследования электрических цепей. При этом очевидно, что уравнения связи должны образовывать в случае трех заземлителей систему уравнений шестого порядка (по числу взаимных и собственных сопротивлений).

Формально особенности решений системы уравнений шестого порядка можно оценить при решениях для схемы замещения с искомыми резисторами. Расчётная схема (используется и для физического моделирования) для группы заземлителей рассмотрена ниже.

Выделим для примера группу из трех заземляющих устройств ЗУ (GD), как показано на рис. 8.

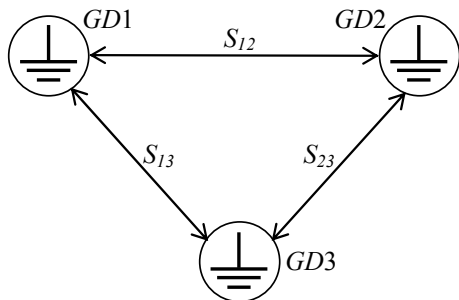


Рис. 8. Варианты размещения (в плане) группы ЗУ (GD) с удалениями  $S$  друг от друга

Отсутствие электрических (проводниковых) связей между ними проверяется обязательно.

По определению – каждое ЗУ можно характеризовать некоторым «собственным» сопротивлением  $R_s$  (как бы в отсутствии влияния «соседей») и эффектом взаимных сопротивлений  $R_{vz}$ .

Кстати, традиционная ситуация (отраженная в инструкциях, руководящих документах и др.) измерения, например,  $R_{GD1}$  вполне соответствует рис. 8 при ЗУ2 (или ЗУ3) – токовый электрод, а ЗУ3 (ЗУ2), соответственно – потенциальный. Причем, рекомендуется обеспечивать возможно низкие взаимные сопротивления (по сути – взаимовлияния) через либо поиск удобных позиций для ЗУ2 и ЗУ3, либо через увеличе-

ние взаиморазделений. Очевидно, рекомендации РД [11, 12] предполагают при их реализации оценку собственного сопротивления ЗУ1.

Будем искать упрощение (против РД) для получения собственно  $R_{GD1}$ , а именно через определение (количественное)  $R_s$  и  $R_{vz}$  в схеме по рис. 8. Реализация этого предложения снимает требование РД по удалению токового электрода от  $R_{GD1}$  (искомого); упрощается измерение собственного потенциала для  $R_{GD1}$ .

Для трех (электрически не связанных) заземлителей (ЗУ), расположенных некоторым образом на территории (рис. 8), использование электростатической аналогии с учетом преобразований (6) и (7) позволяет представить расчётную схему замещения в виде, показанном на рис. 9. Отметим, что исходно для измерений доступны три точки: 1, 2, 3.

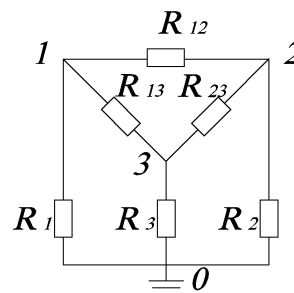


Рис. 9. Расчётная схема замещения для группы из трех заземляющих устройств

Некоторый источник ( $U$ , например, трансформатор) подключаем поочередно к двум точкам системы и измеряем приложенное напряжение, а также напряжения третьей точки относительно двух, подключенных к источнику. Отдельные опыты (I, II и III) показаны на рис. 10 и обозначены как  $a$ ,  $b$  и  $c$  соответственно.

Соответствующие напряжения ( $U_{12}$ ,  $U_{13}$ ,  $U_{32}$ ) в отдельных опытах различны по величинам.

В лабораторных условиях исследована модель схемы замещения (см. рис. 9) с определенными параметрами, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Величины резисторов для схемы по рис. 9

Резистор	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{23}$
Величина, Ом	10	20	5	5	3	3

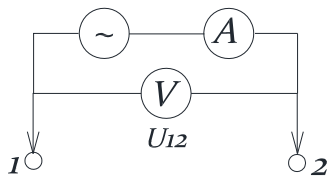
Результаты измерений напряжений приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Измерение напряжений в модели схемы замещения по рис. 9 согласно рис. 10.

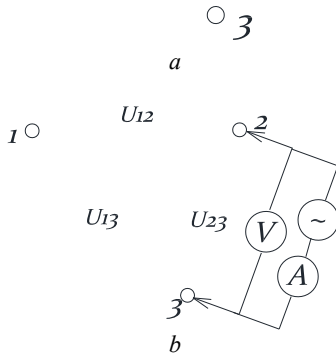
Источник подключен	$U_{12}$ , В	$U_{23}$ , В	$U_{13}$ , В	$\varphi_1$ , В	$\varphi_2$ , В	$\varphi_3$ , В
Опыт I, $U_{12}$	2,75	1,42	1,33	1,18	1,6	0,18
Опыт II, $U_{23}$	1,47	2,31	0,83	0,28	1,77	0,55
Опыт III, $U_{13}$	1,4	0,82	2,24	1,5	0,09	0,74

Напряжения на «собственных» сопротивлениях, измеренные относительно точки «0», обозначены через соответствующие  $\varphi$ .

Соотношения измеренных напряжений описываются системами:



$U_{13}$        $U_{23}$



$U_{12}$        $U_{23}$

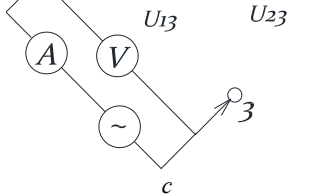


Рис. 10. Подключение источника и измеряемые напряжения в группе заземлителей по рис. 8

Рис. 10,a

$$\begin{cases} U_{12} = \varphi_1 + \varphi_2; \\ U_{23} = \varphi_2 - \varphi_3; \\ U_{13} = \varphi_1 + \varphi_3; \end{cases} \quad (27)$$

Рис. 10,b

$$\begin{cases} U_{12} = \varphi_2 - \varphi_1; \\ U_{23} = \varphi_2 + \varphi_3; \\ U_{13} = \varphi_1 + \varphi_3; \end{cases} \quad (28)$$

Рис. 10,c

$$\begin{cases} U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2; \\ U_{23} = \varphi_2 + \varphi_3; \\ U_{13} = \varphi_1 + \varphi_3. \end{cases} \quad (29)$$

Отдельные равенства в системах (27) – (29) выполняются с приближенностью измерений напряжений.

Формально система, например, (27) имеет три уравнения связи с тремя неизвестными  $\varphi_1, \varphi_2$  и  $\varphi_3$ . Однако система неразрешима путем элементарного исключения одной из неизвестных и дальнейшим решением системы двух уравнений с двумя оставшимися неизвестными.

Вместе с тем отметим, что оценка (по измерениям, расчетам) величин  $\varphi$  в системах (27) – (29) достаточна для получения всех шести искомых сопротивлений (три собственных, три взаимных).

Дополнительные исследования на территории размещения заземляющих устройств ЗУ1, ЗУ2 и ЗУ3 заключаются в снятии градиентных кривых в удобном направлении при подключении напряжения по вариантам рис. 10. Исходим из того, что между двумя заземлителями на поверхности земли при приложении к ним напряжения (рис. 11,a) образуется потенциальное поле  $U_x$ , в том числе и по любой линии  $l$  на поверхности между краями заземлителей (рис. 11,b).

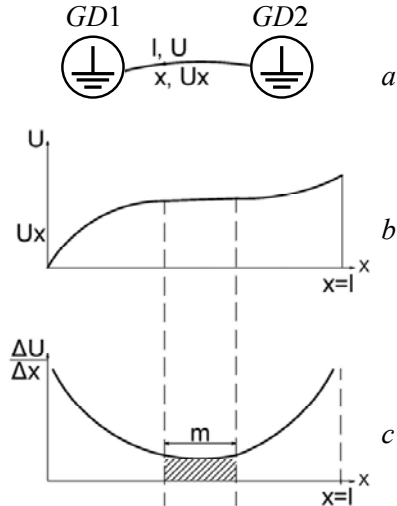


Рис. 11. Потенциальное поле между двумя заземлителями и градиентная кривая

Кривая (потенциальная) по рис. 11,b соответствует градиентной кривой  $\Delta U_x / \Delta x$  (см. рис. 11,c). Измерения  $\Delta U_x$  представляются относительно несложными: входные клеммы вольтметра присоединены к электродам с разномом  $\Delta x$  на длине переставляемого вдоль линии  $l$  шаблона.

Напряжения, измеренные вольтметром (одна клемма – в грунте на участке  $m$ , вторая (по очереди) в точку 1 и точку 2) дают оценку  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Как и большинство измерений для заземлителей, рассмотренный метод для  $\varphi_1, \varphi_2$  приближенный.

Знание  $\varphi_1, \varphi_2$  определит величину  $\varphi_3$  для системы (27); по значениям  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  находим  $\varphi_1$  в (28); по значениям  $\varphi_1$  и  $\varphi_3$  находим  $\varphi_2$  в (29). Последующий возможный расчет проводимостей (сопротивлений) для схемы по рис. 9 рассмотрен выше.

Программа, реализующая изложенную в статье методику, позволяет на основании соответствующих электрических измерений оценить не только сопротивление заземляющих устройств электроустановок, но и как собственные, так и взаимные сопротивления заземлителей всех электродов в трехэлектродной установке измерения сопротивления заземляющего устройства. Также нет необходимости разносить измерительные электроды на большие расстояния и, следовательно, использовать провода большой длины в измерительной схеме трехэлектродной установки. Кроме того, в предложенной методике нет ограничений в расположении измерительных электродов в связи с местными условиями даже в случае плотной застройки территории за пределами исследуемого заземлителя. И, наконец, главное – отпадает необходимость в поиске точки нулевого потенциала на месте

измерений для потенциального электрода или в расчете границы нулевой погрешности, представляющих собой трудоемкий процесс.

Результаты экспериментальных исследований трехэлектродной установки измерения сопротивления заземлителя в электролитической ванне Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» показали, что предложенная методика позволяет получить достаточно точный результат во всех случаях измерений сопротивлений заземляющих устройств электроустановок.

#### Выводы.

1. Впервые приводится теоретическое обоснование новой методики измерения сопротивления заземлителя с помощью трехэлектродной измерительной установки при любом характере неоднородности грунта, любых размерах и конфигурации заземляющих устройств и произвольном размещении измерительных электродов, которая, по своей сути, является универсальной.

2. На основании проведенных исследований установлено, что разработанная методика обладает следующими преимуществами:

- позволяет оценить собственные и взаимные сопротивления заземлителей всех электродов в трехэлектродной установке измерения сопротивления заземляющего устройства;
- отсутствует необходимость в разное измерительных электродов на большие расстояния в измерительной схеме трехэлектродной установки;
- нет ограничений в расположении измерительных электродов в связи с местными условиями даже в случае плотной застройки территории за пределами исследуемого заземлителя;
- отсутствует необходимость в поиске точки нулевого потенциала на месте измерений для потенциального электрода или в расчете границы нулевой погрешности, представляющих собой трудоемкий процесс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнер А.Л. Заземления. – Харьков: ГНТИ Украины, 1938. – 287 с.
2. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
3. Ослон А.Б. Заземляющие устройства на линиях электропередачи и подстанциях высокого напряжения // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. электр. станции, сети и системы. – М.: ВИНТИ. – 1966. – С. 65-184.
4. Кац Е.Л., Меньшов Б.Г., Целебровский Ю.В. Заземляющие устройства электроустановок высокого и низкого напряжений // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. электр. станции и сети. – М.: ВИНТИ. – 1989. – Т.15. – 158 с.
5. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
6. Ослон А.Б., Коструба С.И. Измерение сопротивлений заземлителей больших размеров // Электричество. – 2006. – №8. – С. 49-56.
7. 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.

8. 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.

9. Ослон А.Б., Коструба С.И. Математическое моделирование процесса измерений сопротивления заземлителя току промышленной частоты в многослойном грунте // Электричество. – 2008. – №5. – С. 12-17.

10. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. Ч.3. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 343 с.

11. РД 153-34.0-20.525-00. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. – М.: СПО ОРГРЭС, 2000. – 64 с.

12. 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.

#### REFERENCES

1. Vainer A.L. *Zazemleniia* [Grounding]. Kharkov, GNTI Ukrainy Publ., 1938. 287 p.
2. Kostuba S.I. *Izmerenie elektricheskikh parametrov zemli i zazemlyayushchikh ustroystv* [Measurement of electrical parameters of the earth and ground grids]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 168 p. (Rus).
3. Oslon A.B. Grounding devices on power lines and high voltage substations. *Results of science and tech. VINITI. Ser. el. stations, networks and systems*. Moscow, VINITI Publ., 1966, pp. 65-184. (Rus).
4. Kats E.L., Men'shov B.G., Tselebrovskii Iu.V. Grounding devices of electrical installations of high and low voltage. *Results of science and tech. VINITI. Ser. el. station and networks*. Moscow, VINITI Publ., 1989, vol. 15, 158 p. (Rus).
5. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).
6. Oslon A.B., Kostuba S.I. Measuring the resistance of large grounding devices. *Electrichestvo – Electricity*, 2006, no.8. pp. 49-56. (Rus).
7. 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).
8. 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).
9. Oslon A.B., Kostuba S.I. Mathematical modeling of the process of grounding resistance measurement current of industrial frequency in multilayer soil. *Electrichestvo – Electricity*, 2008, no.5, pp. 12-17. (Rus).
10. Neiman L.R., Kalantarov P.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Ch. 3* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Part 3]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1948. 343 p. (Rus).
11. RD 153-34.0-20.525-00. *Metodicheskie ukazaniia po kontroliu sostoianiiia zazemliayushchikh ustroystv elektroustanovok* [RD 153-34.0-20.525-00. Guidelines for the control of state-earthlings electrical devices]. Moscow, SPO ORGRES Publ., 2000. 64 p. (Rus).

12. SOU 31.2-21677681-19:2009. *Viprobuвання 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).

Поступила (received) 27.12.2015

Нижевский Илья Викторович<sup>1</sup>, инженер.

Нижевский Виктор Ильич<sup>1</sup>, доц., к.т.н.,

<sup>1</sup> Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

тел/phone +38 057 7076977, e-mail: nivich1@mail.ru

I.V. Nizhevskiy<sup>1</sup>, V.I. Nizhevskiy<sup>1</sup>

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

#### **A technique of measuring of resistance of a grounding device.**

**Introduction.** Measurement of resistance of the grounding device (GD) by means of a three-electrode system. This requires not only the right choice of installation locations of measuring electrodes, but also the determination of the point of zero potential. Implementation of these requirements quite time-consuming, and in some cases impossible. **Aim.** Develop a new technique for measuring the electrical resistance of the GD. **Task.** The method of measuring the resistance of the GD with

the help of a three-electrode setup is necessary to exclude the determination of the point of zero potential. **Method.** Mathematical modeling and calculation engine. **Results.** A three-electrode system for measuring the resistance of grounding devices (GD) for various purposes is considered. On the basis of Maxwell equations a theoretical substantiation of a new technique for measuring the resistance of any GD of any construction in random soil structure has been proposed. An equation system of the sixth order has been obtained, its solution makes it possible to measure its own mutual resistance in the three-electrode installation with sufficiently high accuracy. Peculiarities of drawing up a calculation scheme of substitution of a three-electrode installation with lumped parameters: self and mutual impedance. Use of the principle of reciprocity eliminates the need of finding a point of zero potential which is a rather difficult task. The technique allows to minimize the spacing of measuring electrodes outside the GD, which substantially reduces the length of wiring of the measurement circuit and increases the «signal-to-interference» ratio and also removes the restrictions on the development of the territory outside the GD being tested. **Conclusion.** The procedure allows to evaluate the self and mutual impedance grounding all the electrodes in a three-electrode measuring installation of the grounding resistance of the device without finding the point of zero potential. References 12, tables 2, figures 11.

**Key words:** grounding device, resistance measurement, three-electrode installation, minimum spacing of measuring electrodes, technique of measuring, substitution circuit.