

УДК 621.316.993.01

Ю.В. Целебровский

Теория измерения сопротивления заземляющего устройства

Рассмотрена теория измерения сложных заземляющих устройств больших размеров. Показано, что в грунтах, сочетающих вертикальную и горизонтальную неоднородности в электрическом строении, существует единственный вариант расположения вспомогательного потенциального электрода в однолучевой схеме измерения, при котором возможно точное определение сопротивления заземляющего устройства. Предложен алгоритм экспериментального поиска этого варианта на конкретной площадке с неизвестным геоэлектрическим строением. Обсуждены пути реализации этого алгоритма.

Ключевые слова: заземляющее устройство, неоднородный грунт, измерение сопротивления.

Расчёт сложных заземляющих устройств (ЗУ) и измерение параметров заземлителей больших размеров в неоднородных грунтах – это проблема, которая до конца не решена. Камнем преткновения является здесь горизонтальная неоднородность электрических характеристик грунта, существующая наряду с вертикальной неоднородностью. Если для грунтов с вертикальной неоднородностью уже существуют методы и программы расчёта [1, 2 и др.], то в адекватно отражающих реальный грунт моделях с горизонтальной неоднородностью нет методов расчёта даже точечного источника. В этом случае спроектированное и сооружённое заземляющее устройство (ЗУ) может иметь параметры, существенно отличающиеся от расчётных, и не соответствовать требованиям нормативных документов.

В свете сказанного большую роль играют приёмо-сдаточные испытания, по результатам которых, как правило, проводится доводка конструкции ЗУ до соответствия нормам. Ключевым вопросом здесь является точность измерений, обеспечение которой при измерениях в неоднородных грунтах применительно к главному параметру – сопротивлению ЗУ пока не гарантировано ни одним из известных методов. В настоящей статье предлагается один из путей решения этой проблемы.

На рис. 1 показаны кривые распределения потенциалов на поверхности грунта при однолучевой схеме измерения сопротивления заземляющего устройства [3].

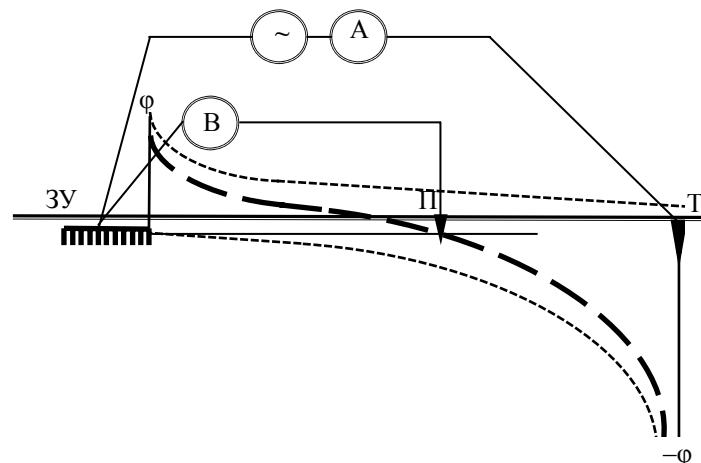


Рис. 1. Распределение потенциалов на поверхности земли, на линии между токовым электродом и ЗУ: ----- потенциалы от тока, стекающего с ЗУ (верхняя кривая) и с токового электрода Т (нижняя кривая); — — — — — потенциалы на поверхности земли (суммарная кривая)

Поле измерительного тока I является суммарное поле токов заземляющего устройства ЗУ и измерительного электрода Т. Так как токи этих заземлителей имеют в каждый момент разное направление, то поле токового электрода снижает потенциал заземляющего устройства $I \cdot R_{ЗУ}$ до значения

$$I R_{ЗУ} - I \alpha_{ЗТ},$$

где $R_{ЗУ}$ – сопротивление заземляющего устройства, которое требуется измерить; $\alpha_{ЗТ}$ – взаимное сопротивление между токовым электродом и ЗУ.

Прибор, измеряющий напряжение на ЗУ, включается между этим потенциалом ЗУ и потенциалом потенциального электрода П, который, в свою очередь, равен

$$I\alpha_{3П} - I\alpha_{ТП},$$

где $\alpha_{3П}$ и $\alpha_{ТП}$ – взаимные сопротивления соответственно между ЗУ и потенциальным электродом, токовым и потенциальным электродами.

Таким образом, измеренное сопротивление $R_{изм}$ будет равно

$$R_{изм} = \frac{U_{изм}}{I} = \frac{IR_{3У} - I\alpha_{3Т} - I\alpha_{3П} + I\alpha_{ТП}}{I}.$$

Из этого выражения можно найти, что $R_{изм}$ будет равно действительному $R_{3У}$ только при условии следующего соотношения взаимных сопротивлений ЗУ и электродов, участвующих в измерительной схеме:

$$\alpha_{ТП} = \alpha_{3П} - \alpha_{3Т}. \quad (1)$$

Такое соотношение взаимных сопротивлений, найденное А.Б. Ослоном [4], при измерениях по схеме, показанной на рисунке, возможно при расположении потенциального электрода П только в одной точке. Потенциал на поверхности грунта в этой точке должен быть отрицательным и равным по значению потенциалу, наводимому токовым электродом на заземляющем устройстве – $I\alpha_{3Т}$. Как показано на рисунке, в этой точке и устанавливается потенциальный электрод П.

В «однородном» грунте, когда на определённом удалении от заземляющего устройства его потенциал можно считать убывающим пропорционально увеличению расстояния до ЗУ, координата этой точки легко вычисляется и равна

$$r_{3П} = 0,618r_{3Т},$$

где $r_{3П}$ и $r_{3Т}$ – расстояния от ЗУ до соответственно потенциального и токового электродов.

На площадке, расположения ЗУ можно найти геометрическое место таких точек, представляющее собой овал, охватывающий ЗУ [3]. В грунтах с вертикальной неоднородностью для реальных ЗУ можно определить положение этой точки расчётами по соответствующим программам.

Однако, как сказано выше, грунт в большинстве случаев, помимо вертикальной, имеет горизонтальную неоднородность, которая особенно проявляется при измерениях заземлителей больших размеров и соответствующих этим размерам больших разностях измерительных электродов. Для этого случая нет расчётных методов, позволяющих определить точку верного измерения. Кроме того, измерения делаются для проверки расчётов, выполненных при проектировании, а расчёты могут иметь погрешности, обусловленные многими факторами: методом расчёта, несоответствием реального грунта расчётной модели, наличием неучтённых естественных заземлителей и т.д. Поэтому сопротивление ЗУ следует определять непосредственно при натурных измерениях реального заземлителя.

Точное измерение возможно при выполнении на реальной площадке соотношения (1). Следовательно, при установке измерительных электродов необходимо экспериментально определять их взаимные сопротивления и, передвигая потенциальный электрод, добиваться выполнения требуемого соотношения. Покажем один из возможных путей решения этой задачи.

Установив на площадке измерений измерительные электроды (токовый на расстоянии, большем, чем характерный размер заземлителя, а потенциальный, например, посередине между токовым электродом и заземляющим устройством, ЗУ), мы, в принципе, можем измерить сопротивления между всеми названными заземлителями:

$R_{ТП}$ – сопротивление между токовым и потенциальным электродами;

$R_{3Т}$ – сопротивление между ЗУ и токовым электродом;

$R_{3П}$ – сопротивление между ЗУ и потенциальным электродом.

Можно показать, что значения этих сопротивлений всегда равны сумме собственных сопротивлений измеряемых заземлителей минус удвоенное взаимное сопротивление между ними:

$$\begin{cases} R_{ТП} = R_T + R_P - 2\alpha_{ТП}, \\ R_{3Т} = R_{3У} + R_T - 2\alpha_{3Т}, \\ R_{3П} = R_{3У} + R_P - 2\alpha_{3П}. \end{cases} \quad (2)$$

Из (2) находим:

$$\alpha_{ТП} = \frac{R_T + R_P - R_{ТП}}{2}; \quad \alpha_{3Т} = \frac{R_{3У} + R_T - R_{3Т}}{2}; \quad \alpha_{3П} = \frac{R_{3У} + R_P - R_{3П}}{2}.$$

С учётом соотношения (1) получим, что при правильной расстановке электродов должно соблюдаться равенство

$$R_{3У} = \frac{R_{3Т} + R_{3П} - R_{ТП}}{2}.$$

Если это равенство не соблюдается, потенциальный электрод следует переместить в соответствующую сторону.

К сожалению, для реализации этого алгоритма необходимы по крайней мере три жёстких условия:

1. Измерительный прибор должен измерять сотни ом с точностью до сотых долей ома, ибо собственное сопротивление ЗУ (R_3) на 2–3 порядка ниже измеряемых сопротивлений между электродами ($R_{ТП}$, $R_{3Т}$, $R_{3П}$).

2. Требуется полное исключение электромагнитного влияния токовой линии на потенциальную. Для этого необходима соответствующая измерительная аппаратура или сложная прокладка проводов этих линий.

3. Необходимо с точностью до второго знака после запятой знать сопротивления соединительных проводов и практически до тысячных долей уменьшить сопротивление контакта проводов с прибором и электродами.

Соблюдая эти условия, мы сможем расположить потенциальный электрод в необходимой точке и точно измерять сопротивления больших заземляющих систем, определяя затем возникающие напряжения на корпусах заземлённого оборудования при коротких замыканиях в электрической сети.

Заключение

1. Показано, что на прямой, соединяющей измеряемый заземлитель с токовым электродом, существует точка установки потенциального электрода, обеспечивающая абсолютно точное измерение сопротивления ЗУ при любой неоднородности грунта (включая горизонтальную).

2. Предложен алгоритм поиска такой точки в полевых условиях и точного измерения сопротивления при любом характере неоднородности грунта, любых размерах и конфигурации заземляющего устройства. Обсуждён способ реализации этого алгоритма, не требующий применения расчётных программ.

Литература

1. Целебровский Ю.В. Заземляющие устройства электроустановок высокого и низкого напряжений / Ю.В. Целебровский, Е.Л. Кац, Б.Г. Меньшов. – М.: ВИНТИ, 1989. – 160 с.
2. Нестеров С.В. Математическая модель заземляющего устройства / Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: сб. докл. / Под ред. Ю.В. Целебровского. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2002. – С. 43–50.
3. Измерения параметров заземляющих систем / Ю.В. Целебровский, М. Файдт, В. Яблонски, П. Поспишил. – М.: Информэнерго, 1978. – 76 с.
4. Ослон А.Б. Об измерениях сопротивления заземления // Электричество. – 1957. – № 2. – С. 56–58.

Целебровский Юрий Викторович

Д-р техн. наук, профессор учебно-научной лаборатории электротехнического материаловедения Новосибирского государственного технического университета
Тел.: 8 (383) 346-01-15
Эл. почта: juvts@mail.n-sk.ru

Tselebrovskiy Yu.V.

The theory of measurement of resistance of earthing device

The theory of measuring of complex earthing devices of large sizes is considered. It is shown that in grounds combining vertical and horizontal heterogeneity in an electric structure, there is an only variant of location of auxiliary potential electrode in the one-radial scheme of measuring, when exact determination of resistance of earthing device is possible. It is offered the algorithm of experimental search of this variant on a measurement area with an unknown geoelectric structure. The ways of realization of this algorithm are discussed.

Keywords: earthing device, heterogeneous ground, resistance measurement.