

Метод контроля ЗУ больших размеров в условиях городских и промышленных застроек

Инженеры Базанов В.П., Путова Т.Е., Спирин М.В.,
СДНРЭ, ОАО «Инженерный Центр»

Настоящий метод разработан для измерения сопротивления ($R_{з\text{у}}$) растеканию эл. тока с заземляющего устройства (ЗУ) достаточно больших размеров, например ЗУ станции или подстанции, в условиях, осложненных наличием промышленных или жилых массивов.

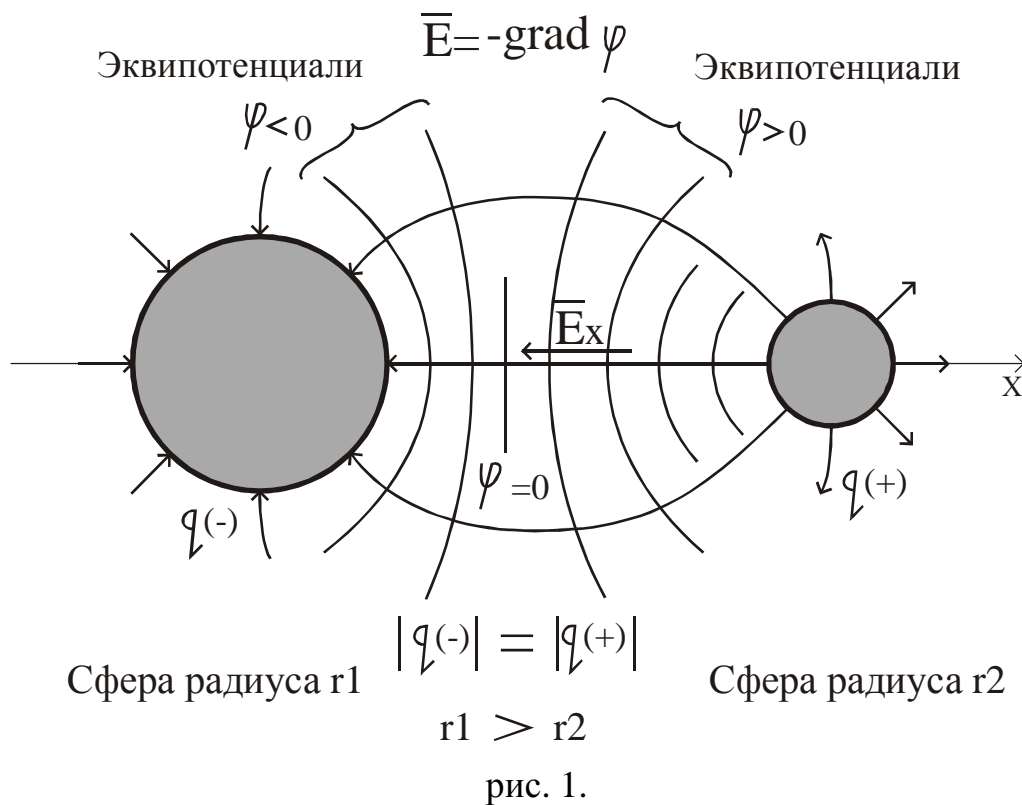
Теоретическая основа предлагаемой методики основана на утверждении, что на ЗУ, имеющих одинаковые величины сопротивлений, при протекании одного и того же тока создаются одинаковые величины падений напряжений. Также положено, что форма эквипотенциалей эл. поля от токов, стекающих в грунт с токового заземлителя измерительной схемы при достаточном удалении от него имеют форму полусфер.

Для теоретического обоснования и выработки рабочих приемов по применению предлагаемой методики использован метод суперпозиции электрических полей и метод электростатической аналогии.

В данном случае рассматривается электрическое поле, создаваемое током измерительной схемы в массиве грунта и, в частности, на его поверхности. Для реализации метода электростатической аналогии в эквивалент плотности тока в массиве грунта принимается поток вектора электростатической индукции электрического поля, создаваемого парой некоторых зарядов q^- и q^+ . При этом один из зарядов приписывается непосредственно контролируемому ЗУ (пусть это будет q^-) а второй - токовому электроду измерительной схемы (пусть это будет q^+). Из факта, что сколько тока стекает с токового электрода измерительной схемы столько его и концентрируется на элементах контролируемого ЗУ и из физической сути метода электростатической аналогии следует, что упомянутые выше заряды q^- и q^+ по модулю равны между собой. Обстоятельство равенства упомянутых зарядов использовано при качественном анализе картины потенциальной диаграммы рассматриваемого эл. поля.

Реализуя метод электростатической аналогии, рассмотрим две металлические сферы. Сфера радиуса r_1 и сфера радиуса r_2 (пусть $r_1 > r_2$). Сферы расположены в вакууме на прямой X , проходящей через их центры. Пусть сфера r_1 имеет заряд q^- , а сфера r_2 заряд q^+ . Естественно, в окружающем пространстве (вне сфер) будет создано электрическое поле $E(x,y,z)$ пространственная топография которого известна.

Рассмотрим картину поля в общем для обеих сфер сечении их меридианной плоскостью.



Картина полученного плоского так же хорошо известна. Однако, выделим две особенности рассматриваемого поля. Из факта равенства зарядов $q^- = q^+$ и принципа суперпозиции полей и следует, что:

По модулю потенциалы сфер соотносятся как $|\varphi(r_1)| < |\varphi(r_2)|$.

Между рассматриваемыми сферами с необходимостью присутствует линия, имеющая нулевой потенциал: $\varphi = 0$ - линия нулевого потенциала.

На прямой X , соединяющей центры рассматриваемых сфер, линия нулевого потенциала представляется точкой - точка нулевого потенциала. Точка эта находится в области где напряженность поля $E(x)$ минимальна, т.е. силовые линии поля E в этой области "меняют свое поведение": их рассосредоточение сменяется фазой их концентрации. Т.е., в этой точке функция $E(x)$ имеет экстремум минимума. Сформулируем критерий по которому можно указать координату x искомой точки нулевого потенциала.

Известно, что напряженность эл. поля и потенциал связаны следующим математическим соотношением: $E = -\text{grad } \varphi$.

Выражение градиента в рассматриваемом частном условии (т.е., условие зондирования величин φ по линии X) раскрывается как:

$$E(x) = \text{grad } \varphi(x) = \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} \cdot 1x. \quad (1)$$

Следовательно, как это известно из теории математического анализа функций, график функции $\varphi(x)$ в точке, соответствующей $E(x)_{\min}$, имеет точку перегиба.

Итак, критерием местонахождения точки нулевого потенциала является точка перегиба графика функции $\varphi(x)$.

Перейдем от воображаемой модели из двух сфер к аналогичной модели из двух полусфер, заглубленных в однородный грунт с удельным объемным

сопротивлением ρ [Ом•м] и циркулирующим током в измерительной цепи I, как это показано на рис.2.

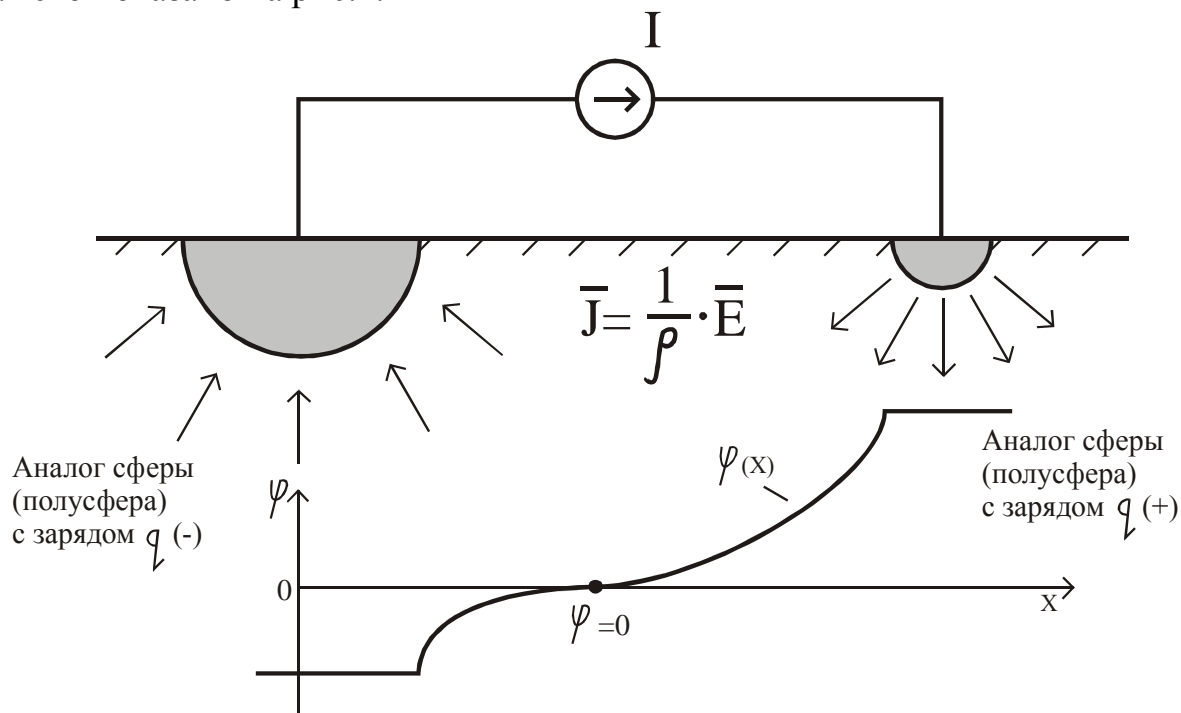


рис. 2.

Электрическое поле от токов на поверхности грунта по топографии будет однозначно соответствовать картине рассмотренного выше электрического поля в меридианной плоскости заряженных сфер.

На том же рис.2 показан график измерения потенциала ϕ по X-направлению, т.е. график зависимости $\phi(x)$. Этот график при некоторой x-координате имеет точку перегиба. Как было показано выше, это и есть координата точки нулевого потенциала. И так, если при использовании соответствующей аппаратуры зафиксировать реальный график зависимости $\phi(x)$, то между рассматриваемыми полусферами всегда представляется возможность указать на поверхности грунта точку, имеющую нулевой потенциал.

Прежде чем продолжить изложение сути предлагаемого метода покажем, что в физическом смысле есть понятие “сопротивление растеканию эл. тока” как таковое.

Итак, рассмотрим проводящую полусферу радиуса r, заглубленную в грунт с удельным объемным сопротивлением ρ [Ом•м]. В этом случае сопротивление растеканию эл. тока с полусферы будет описываться известным выражением (2).

$$R_{зу.} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{r}, \quad \text{Ом.} \quad (2)$$

Где $R_{зу.}$ – сопротивление ЗУ растеканию эл.тока, Ом.

ρ - удельное объемное сопротивление грунта, Ом•м.

r - радиус рассматриваемой полусферы, м.

Характерной чертой выражения (1) является то, что в нем отсутствуют такие традиционные при измерении $R_{зу}$. величины как ток и напряжение. В нем фигурируют лишь электрофизическая характеристика грунта (ρ) и геометрический размер (r) - радиус рассматриваемой полусферы.

Следовательно, имея величины ρ и r , из (2) всегда можно получить искомую величину $R_{зу}$., Ом.

Сформулируем утверждение, на базе которого и основана физическая суть предлагаемого метода (назовем его метод эквивалентной полусферы). При достаточном удалении токового электрода измерительной схемы от границ сколь угодно сложного по конфигурации ЗУ в эквивалент ему (ЗУ) всегда можно поставить проводящую полусферу, образованную некоторой эквипотенциалью от тока стекающего с токового электрода. При этом потенциал на данной эквипотенциали численно равен, но противоположен по знаку потенциалу на контролируемом ЗУ.

Радиус полусферы - эквивалента определяется по результатам обработки графика зависимости $\varphi(x)$, полученного в результате измерений.

Для реализации приведенного утверждения в практических измерениях следует дать два пояснения. Во первых, следует показать, что это такое "... достаточное удаление ...". Из (2) видно, что радиус полусферы r и сопротивление ($R_{зу}$.) соотносятся следующим образом:

$$r = \frac{\rho}{2\pi \cdot R_{зу}} \text{ , м} \quad (3)$$

Из (3) проявляется возможность сформулировать критерий определения величины удаленности (L , м) токового электрода измерительной схемы от границ контролируемого ЗУ:

$$L \geq 1,5 \cdot r = \frac{1,5 \cdot \rho}{2\pi \cdot R_{зу. \text{ Норм.}}} \quad (4)$$

В этом случае в (4) за величину $R_{зу.норм.}$ принимается величина сопротивления ЗУ, регламентированная нормативно-технической документацией. Так например, при норме $R_{зу} \leq 0,5$ Ом и $\rho = 100$ Ом•м величина $L \geq 47,7$ м. При такой величине L физическая задача по определению размера эквивалентной полусферы должна иметь корректное решение. Для этого в выражении (4) величиной 1,5 при r задан некоторый коэффициент запаса. По сути - он (коэффициент 1,5) гарантирует "несоприкосновение" эквивалентной полусферы с границами контролируемого ЗУ, обеспечивая корректность применения предлагаемого метода.

И второе дополнение к вышеприведенному утверждению. Расстояние L отсчитывается от границы ЗУ в направлении нормали к этой границе. Это

есть описанное выше X направление. Снятие графика зависимости $\varphi(x)$ выполняется по данной L линии (что равно - по X направлению).

Строго говоря, потенциальное зондирование (снятие графика зависимости $\varphi(x)$) необходимо проводить относительно зоны нулевого потенциала, т.е. относительно “бесконечно удаленной” области грунта, что реализовать на практике весьма непросто. Именно в этом и есть суть проблемы измерения сопротивления обширных ЗУ. Рассмотрим как можно зарегистрировать характер изменения потенциальной диаграммы в описанном выше X направлении в пределах расстояния L .

Для этого, обратившись к материалам [1], заметим, что, применив прием построения зависимости измеренного сопротивления $R_{зу.изм.}$ от расстояния между границей ЗУ и потенциальным электродом, получаем график $R_{зу.изм.}(x)$.

Вследствие того, что показания измерителя заземления при измерениях будут пропорциональны разнице потенциалов на клеммах потенциальной цепи (клеммы П1, П2), график $R_{зу.изм.}(x)$ в динамике своих изменений будет точно идентифицировать график $\varphi(x)$, а точка его перегиба будет соответствовать точке нулевого потенциала.

Итак, используя стандартные измерители сопротивления заземляющих устройств в пределах удаленности L всегда можно снять зависимость $R_{зу.изм.}(x)$, как это указано в [1], и выявив область перегиба графика, отметить точку нулевого потенциала.

Далее необходимо определить радиус полусферы – эквивалента ($r_{э}$), которая имела бы такое же сопротивление, что и контролируемое ЗУ.

Величину $r_{э}$ определяют по результатам обработки полученного графика $R_{зу.изм.}(x)$ из факта, что заземляющие устройства, имеющие одинаковые сопротивления (не зависимо от геометрических особенностей ЗУ), при стекании одного и того же тока имеют одинаковые уровни напряжений относительно точки нулевого потенциала.

На рис.3 показан практический прием определения величин $r_{э}$.

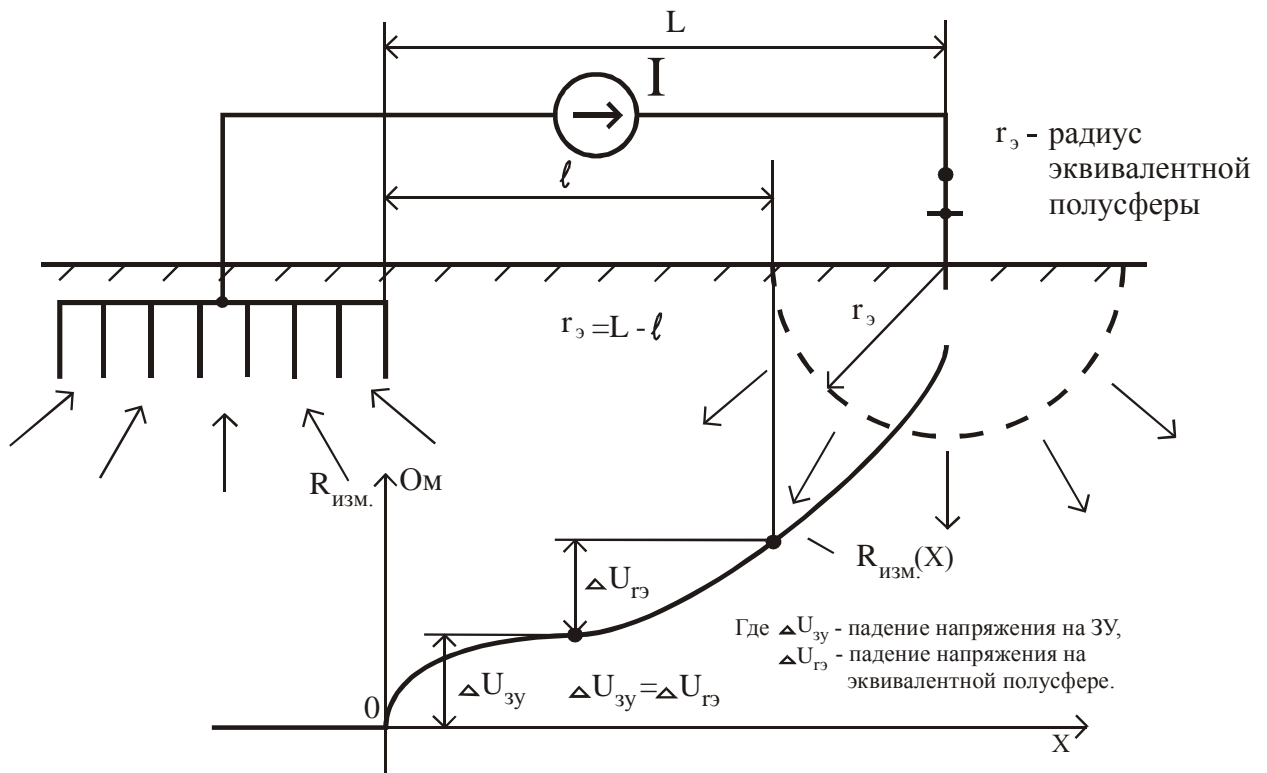


рис. 3.

Тогда сопротивление контролируемого ЗУ, исходя из (2), определится выражением (5):

$$R_{зy} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_3}, \text{ Ом.} \quad (5)$$

При этом, удельное сопротивление грунта (ρ) следует измерять по симметричной схеме Винера с разноской смежных электродов на $20 \div 25$ м. между собой. Такой подход в замере ρ обусловлен двумя факторами. Во первых, в способе Виннера так же заложена идея полусферической формы эквипотенциалей. Во вторых, при таких размерах измерительной схемы “усредняются” частные неоднородности удельного объемного сопротивления грунта и замером охватывается тот массив грунта в который будет “помещаться” воображаемая эквивалентная полусфера.

Порядок реализации на практике предлагаемого метода эквивалентной полусферы

1. Производится измерение удельного объемного сопротивления грунта, ρ [Ом•м].
2. По выражению (4) вычисляется L . Как правило, расчетная величина L не превышает 100-150 м.
3. На местности в окрестностях ЗУ выбирается направление в котором можно бы было разместить токовый электрод измерительной схемы на расстояние не менее L от границы контролируемого ЗУ.

4. С использованием проектных документов, дополнительно применив либо приборный комплекс КДЗ, либо локальное зондирование, либо проведя частичное вскрытие грунта - определяется граница ЗУ. От этой установленной границы в направлении нормали к ней (это есть описанное выше Х-направление) отмеряется расстояние не менее L и заглубляется токовый электрод измерительной схемы.
5. Собирается измерительная схема и производится снятие зависимости $R_{зу.изм.}(x)$ как это описано в [1]. Разница в проведении замеров заключается лишь в том, что их следует производить не в фиксированных точках, как это указано в [1], а произвольно меняя шаг зондирования. В области где начинает проявляться точка перегиба измерения следует производить с интервалом не более 0,5м. Как правило точка эта находится не далее 5-10 м. от границ ЗУ. Соответственно зондирование имеет смысл проводить не далее 20-25 м от границы ЗУ. Как показывает практика, этого достаточно для построения участка графика $R_{зу.изм.}(x)$, содержащего точку нулевого потенциала которая при построении и обработке графика всегда с очевидностью выявляется.
6. Строится масштабное изображение графика $R_{зу.изм.}(x)$ и, с использованием приема приведенного на рис (3), определяется радиус эквивалентной полусферы гз.
7. По выражению (5), определяется сопротивление растеканию эл. тока с контролируемого ЗУ.

Литература.

1. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок (РД 153-34.0-20.525-00). Фирма «ОРГРЭС», Москва 2000 г.