

СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ И МЕТОД ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДВУХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ С НЕИЗВЕСТНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

К.П. ЧЕРНОВ

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

В работе проведён анализ и критика существующего определения сопротивления заземлителя. Предложен уточнённый вариант его определения. Введены понятия особой и квазиэквипотенциальной областей заземлителя. Предложен новый метод измерения его сопротивления. Проведена экспериментальная проверка предложенного метода, подтвердившая его правомерность.

Ключевые слова: энергетическая система, заземлитель, сопротивление заземлителя, методы измерения сопротивлений заземлителей.

Заземлители в энергетических системах имеют огромное значение. Помимо обеспечения электробезопасности заземляющие устройства выполняют и ряд других функций: защиту различных объектов от воздействия молний, защиту электроустановок от внутренних перенапряжений, обеспечения необходимых условий для срабатывания релейной защиты и т.д. Для эффективного выполнения этих функций заземляющие устройства должны обладать определёнными значениями их сопротивления.

Таким образом, понятие сопротивления заземлителя и методика измерения его величины имеет важнейшее значение в работе различных электросистем и объектов.

В последней Инструкции по молниезащите [1] даётся следующее определение сопротивлению заземляющего устройства: "Сопротивление заземляющего устройства – отношение напряжения на заземляющем устройстве к току, стекающему с заземлителя в землю", где "Напряжение на заземляющем устройстве – напряжение, возникающее при стекании тока с заземлителя в землю между точкой ввода тока в заземлитель и зоной нулевого потенциала". Недостатком приведённого определения является то, что в нём не указывается способ нахождения "зоны нулевого потенциала", а приборов, измеряющих абсолютное значение потенциала, не существует.

В настоящее время используется ряд методик измерения сопротивлений заземлителей, основанных, главным образом, на так называемом методе "амперметра и вольтметра" [2-5]. Суть его заключается в следующем (см. рис. 1, 2). На некотором расстоянии от исследуемого заземлителя (З) устанавливается в землю токовый электрод (Т). С помощью источника питания ($U_{ист}$) в электрической цепи "заземлитель - токовый электрод" задаётся определённая величина тока, измеряемая амперметром (А). Принципиальная и эквивалентная электрическая схемы измерения сопротивления заземлителя по методу амперметра и вольтметра показаны на рис. 1а, 2а. С помощью вольтметра (V) и так называемого потенциального электрода (П) измеряется падение напряжения между входами в заземлитель и в потенциальный электрод ($U_{зп}$), возникающее при протекании тока в цепи "заземлитель - токовый электрод". При изменении расстояния между заземлителем и потенциальным электродом путём перестановки последнего величина $U_{зп}$ изменяется. При достаточном взаимном удалении заземлителя и токового электрода в земле между ними появляется

пространственная область, где потенциал изменяется настолько мало, что эту область в измерениях и принимают за зону "нулевого потенциала" (на рис 1а, б она обозначена буквой "Э"). В то же время с физической точки зрения пространственную область, где потенциал изменяется меньше, чем требует допустимая точность измерений, правильнее назвать *квазиэквипотенциальной областью*. В дальнейшем в статье этот термин и будет использоваться. В методе "амперметра и вольтметра" сопротивление заземлителя определяется отношением показания вольтметра, когда потенциальный электрод находится в квазиэквипотенциальной области, к показанию амперметра. Поскольку внутреннее сопротивление вольтметра обычно значительно больше сопротивления заземления потенциального электрода, то показания вольтметра с определённой точностью равно падению напряжения между входом в заземлитель и квазиэквипотенциальной областью (величина U_3 на рис. 1, в). То есть в указанном методе за сопротивление заземлителя принимается отношение напряжения между входом в заземлитель и квазиэквипотенциальной областью к току, стекающему с заземлителя в землю. А это не что иное, как сопротивление между входом в заземлитель и квазиэквипотенциальной областью. Таким образом, с учётом существующей методики измерения логичнее определить *сопротивление заземлителя* как сопротивление между входом в заземлитель и квазиэквипотенциальной областью. Данное определение заземлителя устраняет указанную выше неопределённость существующего определения и, кроме того, делает его практически эквивалентным определению сопротивления классического двухполюсника.

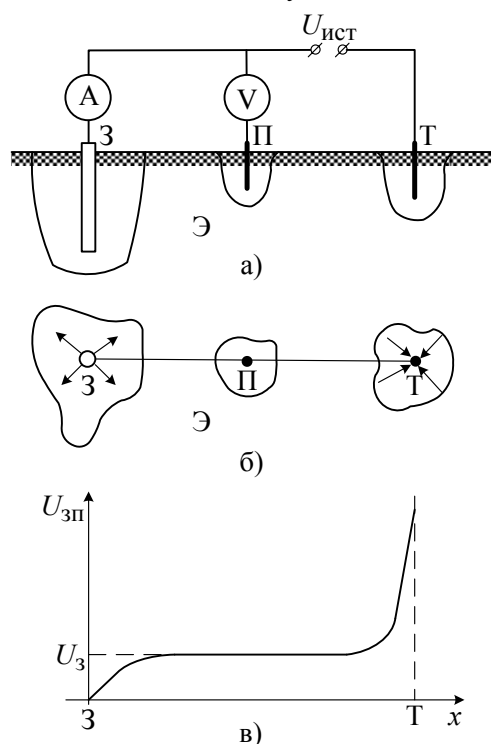


Рис. 1. Принципиальная схема измерения сопротивления заземлителя по методу амперметра и вольтметра (а), примерные границы областей резкого спада потенциала заземлителя, потенциального и токового электродов на поверхности земли (б) и потенциальная кривая между заземлителем и токовым электродом (в)

На рис. 1, в показана зависимость напряжения $U_{зп}$ (потенциальная кривая между заземлителем и токовым электродом) от расстояния между заземлителем и потенциальным электродом. В ней достаточно ярко проявляются области резкого спада потенциала заземлителя и токового электрода. Эти области и определяют основную величину сопротивлений заземления заземлителя и токового электрода. Пространственную область вблизи заземлителя, которая обуславливает его сопротивление заземления с заданной точностью, будем называть в дальнейшем *особой областью заземлителя*. Примерные границы особых областей заземлителя, потенциального и токового электродов указаны на рис. 1а, б сплошными линиями. Вследствие неоднородности грунта эти границы, как правило, не имеют форму правильных геометрических фигур. Сопротивления этих областей, т.е. сопротивления заземлению заземлителя, потенциального и токового электродов, обозначены на эквивалентной электрической схеме рис. 2, а соответственно $R_з$, $R_п$ и $R_т$. При измерениях особые области заземлителя и электродов не должны пересекаться. Из практических измерений сопротивлений различных заземлителей следует, что размеры их особых зон зависят от удельного сопротивления грунта, его структуры и конструкции самого заземлителя. Протяжённость их от входа в заземлитель может составлять от нескольких до десятков метров, а для заземлителей больших объектов, как промышленные здания, может достигать и более ста метров.

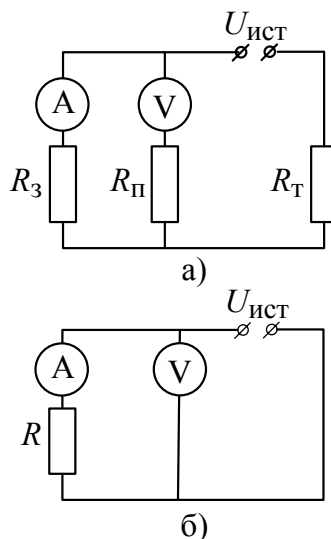


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема измерения сопротивления заземлителя по методу амперметра и вольтметра (а), принципиальная схема измерения сопротивления двухполюсника (б)

Недостатки и погрешности в измерениях сопротивлений заземлителей методом амперметра и вольтметра можно выявить из анализа принципиальной и эквивалентной электрической схем рис. 1, 2. Они достаточно глубоко проанализированы и широко освещены в литературе. Укажем здесь только на два из них [4].

Токовый электрод обычно имеет сопротивление $R_т$ существенно большее, чем $R_з$. При измерениях очень малого значения $R_з$ для того, чтобы поднять потенциал заземлителя и, тем самым, снизить влияние помех, через заземляющее устройство иногда приходится пропускать токи более 100 А. Это, в свою очередь, требует применения специального оборудования.

При измерениях сопротивления заземлителя в стеснённых условиях часто не удаётся выполнить условие недопустимости пересечения особых областей токового

электрода и заземлителя. При этом "зона нулевого потенциала" явно не выделяется. Приходится использовать различные ухищрения, снижающие точность измерений.

Ниже предлагается принципиально новый самостоятельный метод измерения сопротивлений заземлителей, возможности которого в некоторых случаях позволяют преодолеть указанные выше проблемы более простым способом.

Пусть имеются три заземлителя, разделённые в земле квазиэквипотенциальной областью. Их сопротивления заземлению изначально неизвестны и равны, соответственно R_1, R_2, R_3 . В процессе измерения обычным для двухполюсника методом (рис. 2, б) замеряются значения сопротивлений между входами 1-го и 2-го заземлителей (R_{12}), затем между входами 2-го и 3-го заземлителей (R_{23}) и, наконец, между входами 1-го и 3-го заземлителей (R_{13}). Поскольку в каждом измерении сопротивления, R_1 и R_2 , R_2 и R_3 , R_1 и R_3 включены в электрической цепи последовательно, то можно составить систему уравнений:

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

Решение этой системы имеет вид:

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

Таким образом, по измеренным величинам сопротивлений R_{12} , R_{23} и R_{13} с помощью выражений (2) можно определить собственные сопротивления заземлению всех трёх заземлителей.

Экспериментальная проверка предложенного способа измерения сопротивлений заземлителей была проведена хорошо известным методом физического моделирования, основанном на теории подобия [5]. В используемой модели в качестве земли (проводящей среды) использовалась водопроводная вода, залитая в бак с размерами $1 \times 1,5 \times 1$ м. Материал бака – нержавеющая сталь. Electroды для заземлителей были изготовлены из цилиндрического стержня диаметром 2 мм. Материал стержня – также нержавеющая сталь. Electroды устанавливались вертикально на поверхности воды с помощью пенопластовых поплавков. Глубина погружения трёх electroдов в воду была следующая: $l_1 = 140$, $l_2 = 100$ и $l_3 = 70$ мм. Вследствие разной глубины погружения их сопротивления заземлению соответственно R_1 , R_2 и R_3 , отличались друг от друга.

Измерение сопротивлений во всех случаях проводилось по схеме рис. 2, б. При этом переменное напряжение с частотой 50 Гц всегда равнялось $U_{\text{ист}} = 17$ В. Переменным параметром в цепи являлась контролируемая величина тока I . Измеряемое сопротивление определялось отношением напряжения $U_{\text{ист}}$ к току I .

Предварительно были оценены размеры особых зон заземлителей. Для этого для каждого заземлителя были сняты зависимости тока в цепи I между входом в заземлитель и стенкой бака от расстояния между ними r . Во всех случаях они были близки друг другу. Для иллюстрации на рис. 3 представлена данная зависимость для первого заземлителя. На этом рисунке значения I_1 (обозначены кружками) соответствуют экспериментальным результатам, сплошная кривая I_{T1} построена согласно аналитическому выражению

$$I_{T1} = 0,04 \cdot e^{-14r} + 0,122. \quad (3)$$

Из рисунка видно, что выражение (3) достаточно хорошо описывает экспериментальную зависимость, а при $r > 0,22$ м ток I_1 практически не изменяется.

© Проблемы энергетики, 2012, № 5-6

Таким образом, можно сделать вывод, что радиус особой области этого заземлителя составляет ориентировочно 22 см. Кроме того, проведённые измерения показали, что при удалении модели заземлителя от стенок бака на большее расстояние последние не влияют на его параметры. Этот факт объясняется тем, что между моделью заземлителя и стенками бака появляется квазиэквипотенциальная область. Все последующие измерения были проведены при расположении электродов в центральной части бака, удалённой от стенок бака не менее чем на 22 см.

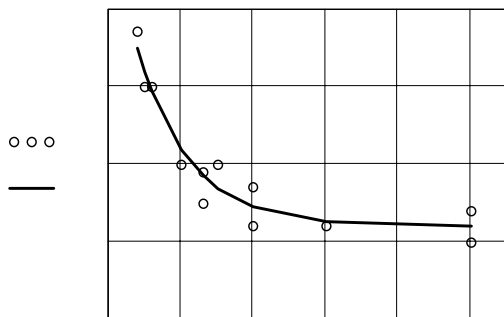


Рис. 3. Зависимость тока, протекающего между 1-м электродом и стенкой бака, от расстояния между ними

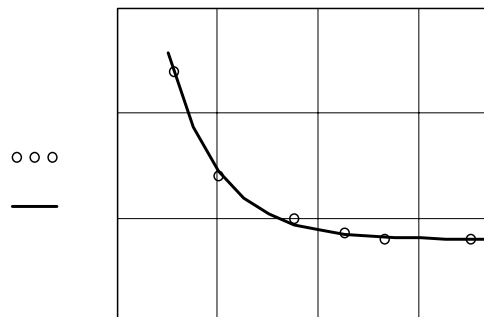


Рис. 4. Зависимость тока, протекающего между 1-м и 2-м электродами, от расстояния между этими электродами

Далее были измерены собственные сопротивления заземления каждого заземлителя. Измерения сопротивлений проводились между входом в заземлитель и стенкой бака. Результаты были следующие: $R_1 = 140 \text{ Ом}$, $R_2 = 170 \text{ Ом}$, $R_3 = 227 \text{ Ом}$.

Перед измерением сопротивлений исследуемых заземлителей предложенным методом дополнительно было проверено минимально допустимое расстояние между ними в процессе последующих измерений. Для этого по схеме рис. 2, б была снята зависимость тока I , протекающего между 1-м и 2-м электродами, от расстояния между этими электродами r (рис. 4). На рис. 4 значения I_{12} (обозначены кружками) соответствуют экспериментальным результатам, сплошная кривая $I_{т12}$ построена согласно выражению

$$I_{т12} = 0,024 \cdot e^{-10r} + 0,049. \quad (4)$$

Из рисунка видно, что выражение (4) достаточно хорошо описывает экспериментальную зависимость, а при $r \geq 0,45 \text{ м}$ ток I_{12} практически не изменяется. Данный факт объясняется результатами предварительных оценок особых зон заземлителей: при расстоянии между заземлителями больше, чем сумма радиусов их особых зон, измеренное суммарное сопротивление двух заземлителей становится равным сумме их собственных сопротивлений заземлению и при дальнейшем увеличении расстояния r не изменяется. Это условие всегда выполнялось в дальнейших измерениях.

Измерения сопротивлений исследуемых заземлителей предложенным методом были проведены при двух вариантах их расположения: 1) в вершинах треугольника (рис. 5, а) и 2) вдоль прямой линии (рис. 5, б). Результаты измерений были следующие. Для первого варианта — $R_{12}^A = 347 \text{ Ом}$, $R_{23}^A = 447 \text{ Ом}$, $R_{13}^A = 405 \text{ Ом}$; результаты вычисления по формулам (2): $R_1^A = 152 \text{ Ом}$, $R_2^A = 194 \text{ Ом}$, $R_3^A = 252 \text{ Ом}$. Для второго варианта — $R_{12}^П = 340 \text{ Ом}$, $R_{23}^П = 425 \text{ Ом}$, $R_{13}^П = 386 \text{ Ом}$. Результаты вычисления по

формулам (2) дают: $R_1^{\Delta} = 151 \text{ Ом}$, $R_2^{\Delta} = 189 \text{ Ом}$, $R_3^{\Delta} = 235 \text{ Ом}$. Здесь верхние индексы "Δ" и "л" указывают на первый и второй варианты расположения заземлителей соответственно.

Анализ результатов измерений показывает, что расхождение всех значений R_1 , R_2 и R_3 не превосходит 14 %. В подобных измерениях такая погрешность является вполне допустимой.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты убедительно подтвердили правомерность предложенного метода.

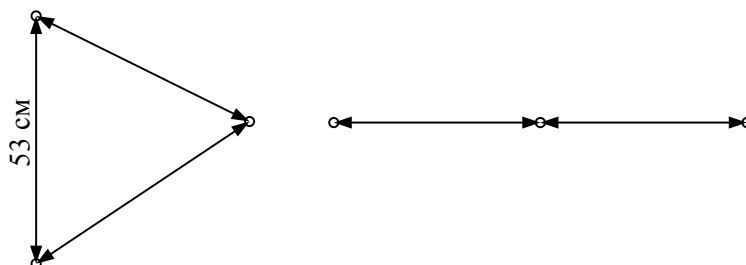


Рис. 5. Расположение электродов заземлителей в процессе измерений (вид сверху): а) – в вершинах треугольника, б) – вдоль прямой линии

Следует отметить, что, поскольку дополнительные два заземлителя в этом методе могут быть выбраны произвольно, в практических измерениях явно появляются две новые возможности по сравнению с известным методом. Во-первых, при измерениях сопротивления заземлителя в условиях электропомех с целью поднятия потенциала заземлителя и снижения, тем самым, влияния этих помех можно в качестве дополнительных заземлителей выбрать имеющиеся на данной территории заземлители с малым сопротивлением, например заземлители каких-либо зданий или сооружений, имеющих обычно сопротивления не более 1 Ом (в отличие от сопротивления токового электрода в известном методе, имеющего величину порядка десятков и даже сотен Ом). Во-вторых, при измерениях в стеснённых условиях, для того чтобы обеспечить указанное выше требование непересечения особых областей заземлителей, можно в качестве дополнительных заземлителей использовать удалённые заземлители, находящиеся за объектами, стесняющими измерения. При этом не требуется прибегать к ухищрениям известного метода, снижающим точность измерений. Кроме того, наличие принципиально нового метода может дать в конкретных натурных измерениях какие-то дополнительные не указанные здесь возможности.

В заключение автор выражает благодарность Кочкину В.А. и Андреянову Н.А. за помощь при проведении эксперимента.

Summary

The analysis and criticism of existing definition of resistance of grounding conductor are presented in the paper. More accurate version of its definition is offered. Conceptions of particular and quasi-equipotential regions of a grounding conductor were brought in. New method of measurement of its resistance is suggested. The experimental testing confirming validity of the offered method was carried out.

Key words: power system, grounding conductor, resistance of grounding conductor, methods of measurement of resistances of grounding conductors.

Литература

1. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
2. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Целебровский Ю.В., Микитинский М.Ш. Измерение сопротивлений заземления опор ВЛ. М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Карякин Р.Н., Солнцев В.И. Использование железобетонных фундаментов производственных зданий в качестве заземлителей. М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. М.: Энергия, 1978.

Поступила в редакцию

07 февраля 2012 г.

Чернов Константин Петрович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8 (843) 519-42-70; 8 (843) 517-09-33. E-mail: chernovs@telecet.ru.