

Расчет сопротивления заземляющего устройства

Август 28th, 2012 |  Автор: [E.J.](#) Аврал.Блог Записки электрического джедая

Введение

В настоящее время в сети Интернет можно найти множество статей, рекомендаций и программ по расчету сопротивления заземляющих устройств (ЗУ). Одна из проблем состоит в том, что нередко авторы не приводят ссылку на источник методики расчета. Приходится гадать, насколько автор ответственно подошел к написанию статьи или программы, и не искажил ли формулы в сравнении с первоисточником, исходя из своих соображений «правильности» расчетов. Второй проблемой можно назвать некоторую дезориентацию специалистов в применении той или иной методики, применяемой для расчетов заземляющего устройства. Цель этой статьи – внести некоторую ясность в вопрос расчетов заземляющего устройства. Для этого, проведем расчеты сопротивления ЗУ по разным методикам и сравним результаты, попутно выясняя сильные и слабые стороны методик.

Вот источники, по рекомендациям которых проводились расчеты, приведенные в статье:

1. **Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования** / Под ред. Ю. Г. Барыбина и др. – М: Энергоатомиздат, 1991 г. – 464 с [1].
2. **Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети.** 2-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. – М.: Энергия, 1980. – 576 с, ил [2].
3. Карякин Р. Н. **Заземляющие устройства электроустановок.** Справочник. 2-е издание. М.: Энергосервис, 2006 [3].
4. Карякин Р. Н. **Нормы устройства сетей заземления.** Москва, Энергосервис, 2002 г [4].

Эти источники выбраны на том основании, что подавляющее количество статей, рекомендаций и программ в Интернет используют те же самые (или похожие) формулы. Материал из [4] используется в качестве проверочного и вспомогательного к материалу, изложенному в [3].

Разумеется, нельзя объять необъятное, и автор этой статьи не ставит задачи о полном сравнении методик. Разберем частный и наиболее встречающийся случай расчета сопротивления комбинированного заземляющего устройства в однослойном и двухслойном грунте.

Постановка задачи.

Заземляющее устройство расположено во второй климатической зоне России и состоит из горизонтальной сетки (размер каждой ячейки 5x5 м), и вертикальных электродов (заземлителей), забитых в грунт в местах расположения узлов сетки. Сетка и вертикальные электроды выполнены из круглой стали диаметром 25 мм. Все соединения выполнены с помощью сварки. Конфигурация заземляющего устройства (ЗУ) показана на рис.1, рис.2 (для однослойного грунта) и рис. 3 (для двухслойного грунта).

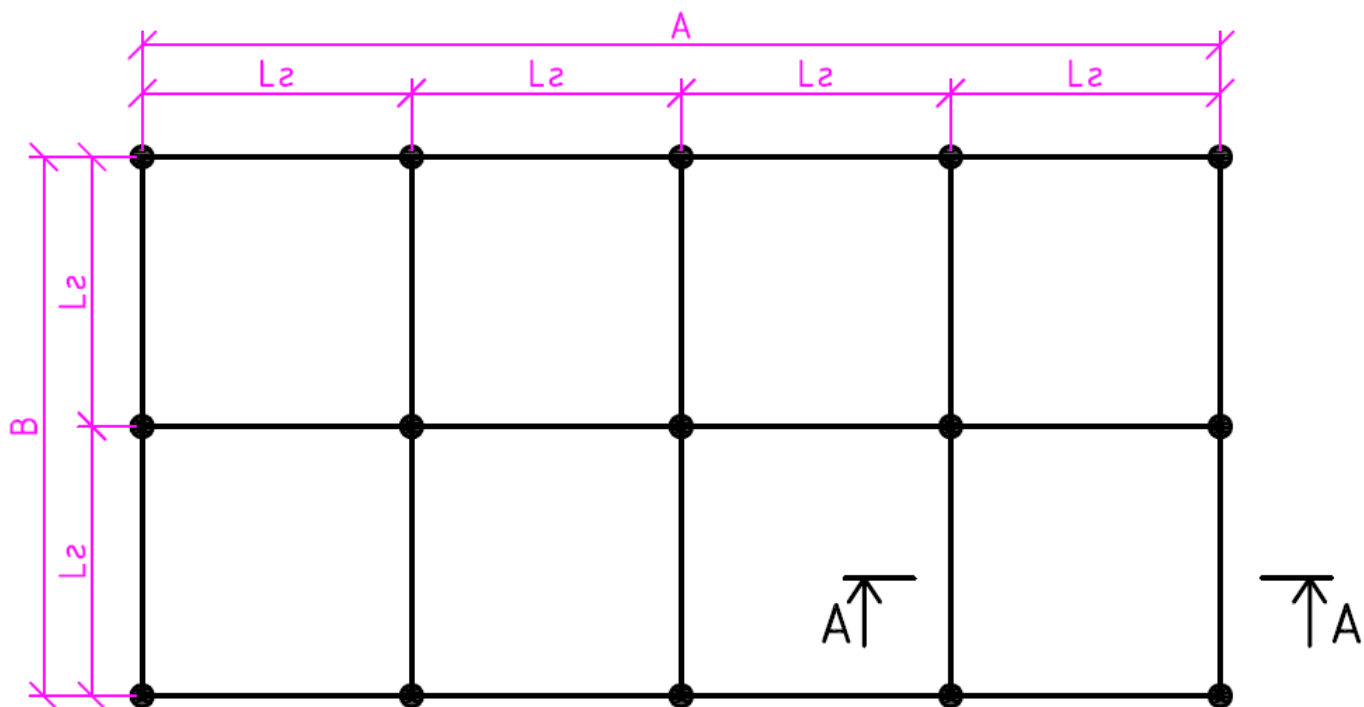


Рис.1. Конфигурация заземляющего устройства (вид сверху).

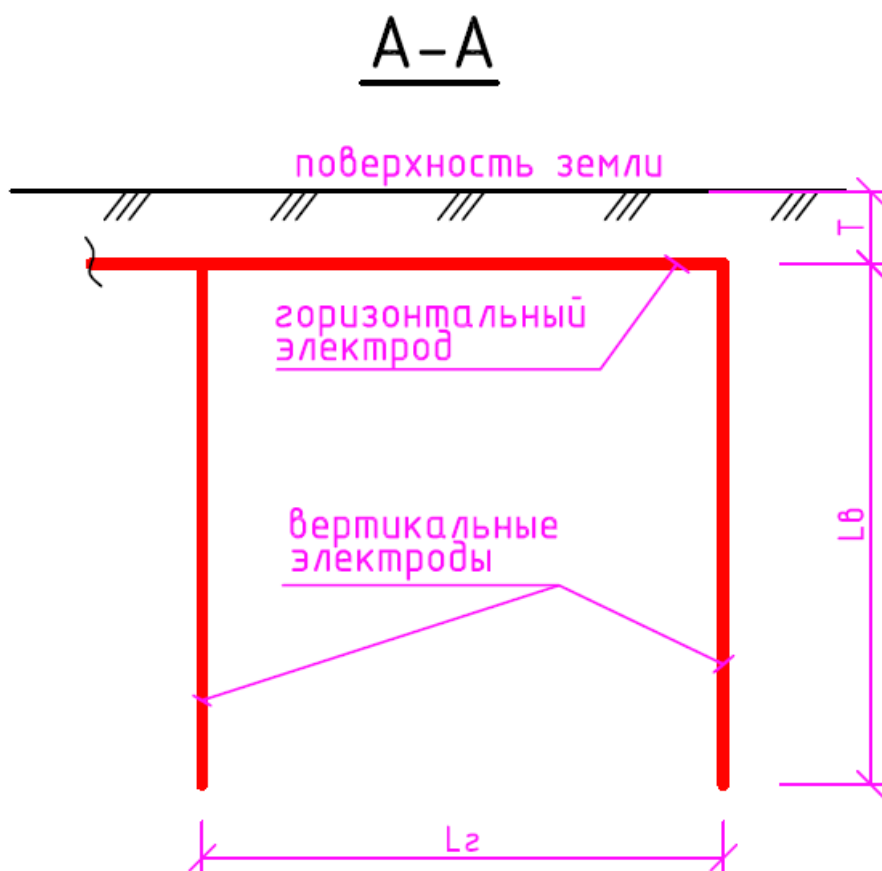


Рис.2. Конфигурация заземляющего устройства (разрез $A-A$) для однослойного грунта.

A-A

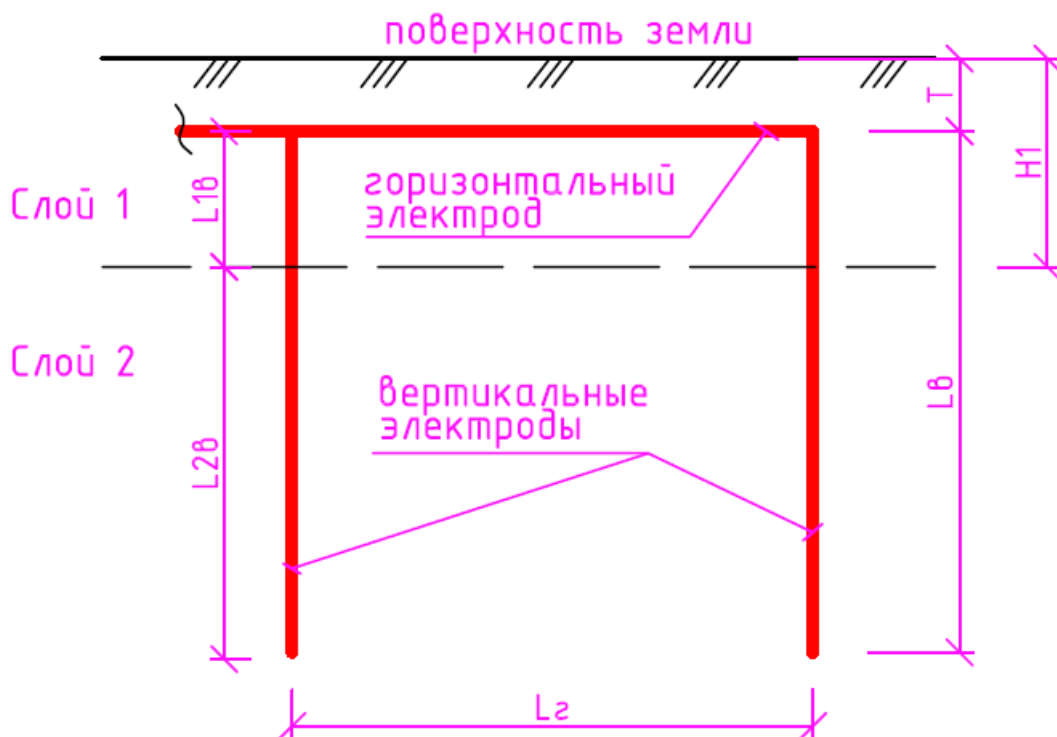


Рис.3. Конфигурация заземляющего устройства (разрез А-А) для двухслойного грунта.

Обозначения и исходные данные:

- $L_{г}=5$ м – размер ячейки горизонтальной сетки (расстояние между вертикальными электродами);
- $L_{сум.г}=110$ м – общая длина горизонтальных заземлителей;
- $L_{в}=5$ м – высота вертикального электрода;
- $L_{1в}$ – часть высоты вертикального электрода, находящаяся в верхнем слое (слой 1) грунта;
- $L_{2в}$ – часть высоты вертикального электрода, находящаяся в нижнем слое (слой 2) грунта;
- $n=15$ шт. – количество вертикальных заземлителей;
- $T=0,7$ м – глубина расположения горизонтальной сетки;
- $H_1=2$ м – толщина верхнего слоя грунта;
- $H_2=\infty$ – толщина нижнего слоя грунта.
- $d=0,025$ м – диаметр круглой стали, из которой изготовлены сетка и вертикальные заземлители;
- $\rho=\rho_1=150$ Ом*м – удельное сопротивление грунта (для двухслойного грунта – удельное сопротивление верхнего слоя);
- $\rho_2=100$ Ом*м – удельное сопротивление нижнего слоя грунта (для двухслойного грунта);
- $A=20$ м – габарит «длины» заземляющего устройства (см. рис.1);
- $B=10$ м – габарит «ширины» заземляющего устройства (см. рис.1);
- $S=200$ кв.м. ($A \times B$) – площадь, занимаемая заземляющим устройством.

Необходимо выполнить расчет сопротивления заземляющего устройства.

Расчет заземляющего устройства по справочнику под редакцией Ю.Г. Барыбина, 1991 г.

Заземляющее устройство в однослойном грунте.

Сопротивление заземляющего устройства R_3 складывается из сопротивлений растеканию отдельных

электродов заземлителя (труб, уголков, полос) и сопротивлений заземляющих проводников. В данной статье при сравнении различных методик сопротивление заземляющих проводников не учитывается. Собственно, это сопротивление не учитывается и в расчетах, приведенных в справочнике.

Сопротивление растеканию каждого электрода (вертикального или горизонтального) зависит от удельного сопротивления грунта с учетом его сезонных изменений; формы, размеров и материала электрода; расположения электрода и глубины погружения его в землю, а также наличия вблизи него других электродов, электрически соединенных с ним.

Удельное сопротивление грунта в справочнике рекомендуется принимать по данным замеров, а при отсутствии таких данных – воспользоваться табличными значениями. Чтобы сравнение методик было более корректным и не зависело от различий табличных данных, примем удельное сопротивление грунта $\rho=150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (см. постановку задачи). Удельное сопротивление промерзшего грунта получается умножением удельного сопротивления, измеренного в нормальных условиях (15 град.С и 10-20% влажности), на поправочные коэффициенты (табличные данные).

Таким образом, в справочнике предлагается рассчитать сопротивление растекания отдельно для горизонтальных электродов (сетки) и вертикальных электродов, применив соответствующие коэффициенты. Результирующее сопротивление заземляющего устройства рассчитывается из предположения, что данную конфигурацию системы электродов можно рассматривать, как параллельное соединение проводников.

Сопротивление одного вертикального электрода R_B определяется по формулам, приведенным в табл.7.9 справочника. Применительно к нашему случаю, формула примет вид:

$$R_B = \frac{0,366 * \rho}{L_B} * \left(\lg \frac{2 * L_B}{d} + \frac{1}{2} * \lg \frac{4 * t + L_B}{4 * t - L_B} \right) =$$
$$= \frac{0,366 * 150}{5} * \left(\lg \frac{2 * 5}{0,025} + \frac{1}{2} * \lg \frac{4 * 3,2 + 5}{4 * 3,2 - 5} \right) = 30,54 \text{ Ом} \quad (1)$$

где t – глубина заложения вертикального электрода (считается расстояние от поверхности земли до

$$t = \frac{1}{2} * L_B + T = \frac{1}{2} * 5 + 0,7 = 3,2 \text{ м} \quad (2)$$

середины электрода):

Примечание.

Строго говоря, в формуле (1) не хватает поправочного коэффициента, учитывающего изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от климатического района. Это сделано автором статьи намеренно для корректного сравнения различных методик расчета. При расчете суммарных сопротивлений этот поправочный коэффициент будет учтен. Также, в самом справочнике допущена ошибка, т.к. в этой формуле отсутствует значение удельного сопротивления грунта. В формулах, идущих в этой же таблице ниже, удельное сопротивление присутствует. В формуле (1) этой статьи ошибка в формуле исправлена.

Суммарное сопротивление части заземлителя, состоящей из вертикальных электродов, электрически связанных между собой, без учета сопротивления соединяющей их полосы:

$$R_{з. в.} = \frac{R_B * K_B}{n * \eta_B} = \frac{30,54 * 1,45}{15 * 0,51} = 5,8 \text{ Ом} \quad (3)$$

где

- $K_B=1,45$ – поправочный коэффициент (для вертикальных заземлителей), учитывающий изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от климатического района, см. табл.7.7 справочника;
- $\eta_B=0,51$ – коэффициент использования вертикальных электродов (без учета влияния полосы

связи), см. табл.7.10 справочника для случая «Трубы размещены по контуру» при отношении расстояния между электродами к длине электрода $L_{\Gamma}/L_{\text{в}}=5/5=1$; значение вычислено с помощью метода линейной интерполяции для средних значений интервальных табличных данных.

Сопротивление растеканию горизонтальной сетки, также может быть определено по формуле из

$$R_{\Gamma} = \frac{0,366 * \rho}{L_{\text{сум.г.}}} * \lg \frac{L_{\text{сум.г.}}^2}{d * T} = \frac{0,366 * 150}{110} * \lg \frac{110^2}{0,025 * 0,7} = 2,91 \text{ Ом} \quad (4)$$

табл.9 справочника:

Сопротивление растеканию горизонтальной сетки с учетом экранирования и климатического района:

$$R_{\text{з.г.}} = \frac{R_{\Gamma} * K_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}} = \frac{2,91 * 3,5}{0,31} = 32,9 \text{ Ом} \quad (5)$$

где

- $K_{\Gamma}=3,5$ – поправочный коэффициент (для горизонтальных заземлителей), учитывающий изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от климатического района, см. табл.7.7 справочника;
- $\eta_{\Gamma}=0,31$ – коэффициент использования сетки, см. табл.7.12 справочника; значение вычислено с помощью метода линейной интерполяции.

Полное сопротивление растеканию заземляющего устройства:

$$R_{\text{з}} = \frac{R_{\text{з.в.}} * R_{\text{з.г.}}}{R_{\text{з.в.}} + R_{\text{з.г.}}} = \frac{5,8 * 32,9}{5,8 + 32,9} = 4,93 \text{ Ом} \quad (6)$$

Заземляющее устройство в двухслойном грунте.

На самом деле, в справочнике под ред. Ю. Г. Барыбина нет методики для расчета сопротивления заземляющего устройства, находящегося в двухслойном грунте. Тем не менее, при определенном подходе, эту методику можно использовать и для двухслойного грунта. При этом принимаются следующие допущения [3]:

- земля, в которой расположен заземлитель, является идеальным бесконечным полупространством, состоящим из двух слоев; толщина верхнего слоя H_1 конечна, нижний слой имеет неограниченную мощность ($H_2=\infty$); в пределах каждого слоя удельное сопротивление земли постоянно и равно ρ_1 и ρ_2 , соответственно; поверхность земли и граница раздела между слоями горизонтальны;
- продольное сопротивление сетки и вертикальных электродов переменному току частотой 50 Гц пренебрежимо мало.

«Определенный» подход заключается в допущении, что сопротивления растеканию верхней и нижней части ЗУ (см. рис.3), расположенных в соответствующем слое грунта, можно считать «соединенными» параллельно. Соответственно, эквивалентное сопротивление растеканию $R_{\text{экв}}$ будет

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (7)$$

определяться следующим образом:

где R_1 и R_2 – сопротивление растеканию верхней и нижней части заземлителя соответственно. Проблема в том, что R_1 и R_2 – неизвестные величины. Эту проблему можно обойти следующим образом. Общеизвестно, что сопротивление прямо пропорционально удельному сопротивлению материала и его длине, и обратно пропорционально площади его сечения. Ток со стержня заземлителя стекает в направлении, перпендикулярном оси этого стержня, равномерно во все стороны. Следовательно, применительно к нашему случаю, сопротивление прямо пропорционально удельному сопротивлению грунта и расстоянию до стержня, и обратно пропорционально площади боковой стенки охватываемого цилиндра, которая в свою очередь является функцией расстояния от стенки цилиндра до стержня (радиуса цилиндра) и высоты этого цилиндра. Так как радиус цилиндра – общая

величина для обеих частей уравнения, ее можно сократить, и останутся только удельное сопротивление грунта и высота вертикального электрода в каждом слое.

С учетом вышесказанного, выражение (7) принимает вид:

$$\frac{L_B}{\rho_{\text{ЭКВ}}} = \frac{L_{1B}}{\rho_1} + \frac{L_{2B}}{\rho_2} = \frac{H_1 - T}{\rho_1} + \frac{L_B + T - H_1}{\rho_2} \quad (8)$$

где $\rho_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное удельное электрическое сопротивление двухслойного грунта.

В уравнении (8) неизвестным является только одна величина – $\rho_{\text{ЭКВ}}$:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ЭКВ}} &= \frac{\rho_1 * \rho_2 * L_B}{\rho_1 * (L_B + T - H_1) + \rho_2 * (H_1 - T)} = \\ &= \frac{150 * 100 * 5}{150 * (5 + 0,7 - 2) + 100 * (2 - 0,7)} = 109,5 \text{ Ом} \quad (9) \end{aligned}$$

Теперь, задача нахождения сопротивления заземляющего устройства в двухслойном грунте с двумя разными удельными сопротивлениями сводится к задаче расчета ЗУ в однослойном грунте с эквивалентным удельным сопротивлением. Подставляя значение $\rho_{\text{ЭКВ}}$ в формулы (1) и (4), определяем R_B и R_{Γ} , а затем по остальным формулам вычисляем R_3 . Результаты расчетов представлены ниже.

$$R_B = \frac{0,366 * 109,5}{5} * \left(\lg \frac{2 * 5}{0,025} + \frac{1}{2} * \lg \frac{4 * 3,2 + 5}{4 * 3,2 - 5} \right) = 22,3 \text{ Ом} \quad (10)$$

$$R_{3.в.} = \frac{22,3 * 1,45}{15 * 0,51} = 4,2 \text{ Ом} \quad (11)$$

$$R_{\Gamma} = \frac{0,366 * 109,5}{110} * \lg \frac{110^2}{0,025 * 0,7} = 2,1 \text{ Ом} \quad (12)$$

$$R_{3.г.} = \frac{2,1 * 3,5}{0,31} = 24,0 \text{ Ом} \quad (13)$$

$$R_3 = \frac{4,2 * 24}{4,2 + 24} = 3,6 \text{ Ом} \quad (14)$$

Итак, полное сопротивление растеканию заземляющего устройства в двухслойном грунте равно 3,6 Ом.

Расчет заземляющего устройства по справочнику под общей редакцией А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского, 1980 г.

Заземляющее устройство в однослойном грунте.

В этом справочнике [2] расчет заземляющего устройства основан на тех же принципах и допущениях, что и в справочнике под ред. Ю.Г. Барыбина [1], но есть несколько отличий, на которых следует остановиться.

Первое отличие заключается в том, что расчет производится не сопротивления R_z по заданной конфигурации ЗУ, наоборот, по заданному сопротивлению растекания R_z определяется количество вертикальных электродов, а, следовательно, и конфигурация всего заземляющего устройства. Если эти же формулы использовать для нахождения R_z , выразив соответствующие величины, то порядок и вид расчетов ничем не будет отличаться от методики, предложенной в справочнике Ю. Г. Барыбина [1]. Поэтому, для корректного сравнения методик, выполним все расчеты в том же порядке, что и предыдущие.

Второе отличие заключается в несовпадении табличных данных для различных климатических зон. Следует заметить, что даже малейшее изменение этого коэффициента серьезно влияет на результат расчета. В [2] значения коэффициентов указаны более высокие, чем в [1], следовательно, при одной и той же конфигурации заземляющего устройства сопротивление растекания будет выше при расчете по справочнику [2].

Третье отличие заключается в написании формул для расчета сопротивления растекания одиночных электродов.

Применительно к решаемой задаче, формулы расчета в справочнике под ред. Ю. Г. Барыбина выглядят следующим образом (см. предыдущие расчеты или табл.7.9 справочника [1]):

- для вертикального электрода

$$R_B = \frac{0,366 * \rho}{L_B} * \left(\lg \frac{2 * L_B}{d} + \frac{1}{2} * \lg \frac{4 * t + L_B}{4 * t - L_B} \right) \quad (15)$$

- для горизонтального электрода

$$R_\Gamma = \frac{0,366 * \rho}{L_{\text{сум. г.}}} * \lg \frac{L_{\text{сум. г.}}^2}{d * T} \quad (16)$$

А вот так выглядят формулы в справочнике под общ. ред. Федорова и Сербиновского (см. [2], табл.8-3):

- для вертикального электрода

$$R_B = \frac{\rho}{2 * \pi * L_B} * \left(\ln \frac{2 * L_B}{d} + \frac{1}{2} * \ln \frac{4 * t + L_B}{4 * t - L_B} \right) \quad (17)$$

- для горизонтального электрода

$$R_\Gamma = \frac{\rho}{2 * \pi * L_{\text{сум. г.}}} * \ln \frac{L_{\text{сум. г.}}^2}{d * T} \quad (18)$$

Очевидно, что с математической точки зрения формулы (15) и (17), а также (16) и (18) идентичны. Действительно, если в формулах (17) и (18) выполнить переход от натурального основания логарифма к десятичному, получим формулы (15) и (16). Этот переход как раз объясняет непонятный коэффициент 0,366 в формулах из справочника [1]:

- для вертикального электрода

$$R_B = \frac{\rho}{2 * \pi * L_B} * \left(\ln \frac{2 * L_B}{d} + \frac{1}{2} * \ln \frac{4 * t + L_B}{4 * t - L_B} \right) = \frac{\rho}{2 * \pi * L_B} * \left(\frac{\lg \frac{2 * L_B}{d}}{\lg e} + \frac{1}{2} * \frac{\lg \frac{4 * t + L_B}{4 * t - L_B}}{\lg e} \right) =$$

$$= \frac{\rho}{2 * \pi * \lg e * L_B} * \left(\lg \frac{2 * L_B}{d} + \frac{1}{2} * \lg \frac{4 * t + L_B}{4 * t - L_B} \right) = \frac{0,366 * \rho}{L_B} * \left(\lg \frac{2 * L_B}{d} + \frac{1}{2} * \lg \frac{4 * t + L_B}{4 * t - L_B} \right) \quad (19)$$

- для горизонтального электрода

$$R_G = \frac{\rho}{2 * \pi * L_{\text{сум.г.}}} * \ln \frac{L_{\text{сум.г.}}^2}{d * T} = \frac{\rho}{2 * \pi * L_{\text{сум.г.}}} * \frac{\lg \frac{L_{\text{сум.г.}}^2}{d * T}}{\lg e} =$$

$$= \frac{\rho}{2 * \pi * \lg e * L_{\text{сум.г.}}} * \lg \frac{L_{\text{сум.г.}}^2}{d * T} = \frac{0,366 * \rho}{L_{\text{сум.г.}}} * \lg \frac{L_{\text{сум.г.}}^2}{d * T} \quad (20)$$

Следовательно, «непонятный» коэффициент определяется выражением

$$\frac{1}{2 * \pi * \lg e} = \frac{1}{2 * 3,14 * \lg 2,71} = 0,366 \quad (21)$$

Теперь, после выяснения отличий методик [1] и [2] можно провести расчет сопротивления заземляющего устройства.

Сопротивление одного вертикального электрода R_B определяется по формулам, приведенным в табл.8-3 справочника. Применительно к нашему случаю, формула имеет вид:

$$R_B = \frac{\rho}{2 * \pi * L_B} * \left(\ln \frac{2 * L_B}{d} + \frac{1}{2} * \ln \frac{4 * t + L_B}{4 * t - L_B} \right) =$$

$$= \frac{150}{2 * 3,14 * 5} * \left(\ln \frac{2 * 5}{0,025} + \frac{1}{2} * \ln \frac{4 * 3,2 + 5}{4 * 3,2 - 5} \right) = 30,54 \text{ Ом} \quad (22)$$

где t – глубина заложения вертикального электрода (считается расстояние от поверхности земли до середины электрода):

$$t = \frac{1}{2} * L_B + T = \frac{1}{2} * 5 + 0,7 = 3,2 \text{ м} \quad (23)$$

Суммарное сопротивление части заземлителя, состоящей из вертикальных электродов, электрически связанных между собой, без учета сопротивления соединяющей их полосы:

$$R_{з.в.} = \frac{R_B * K_B}{n * \eta_B} = \frac{30,54 * 1,65}{15 * 0,51} = 6,6 \text{ Ом} \quad (24)$$

где

- $K_B=1,65$ – поправочный коэффициент (для вертикальных заземлителей), учитывающий

изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от климатического района, см. табл.8-2 справочника; взято значение середины рекомендуемого интервала 1,5-1,8;

- $\eta_v=0,51$ – коэффициент использования вертикальных электродов (без учета влияния полосы связи), см. табл.8-5 справочника при отношении расстояния между электродами к длине электрода $L_g/L_v=5/5=1$; значение вычислено с помощью метода линейной интерполяции для средних значений интервальных табличных данных.

Сопротивление растеканию горизонтальной сетки, определяется по формуле из табл.8-3 справочника:

$$R_g = \frac{\rho}{2 * \pi * L_{\text{сум. г.}}} * \ln \frac{L_{\text{сум. г.}}^2}{d * T} = \frac{150}{2 * 3,14 * 110} * \ln \frac{110^2}{0,025 * 0,7} = 2,91 \text{ Ом} \quad (25)$$

Примечание.

Собственно, вычисления в формуле (22) и (25) можно было и не проводить, а, согласно выводу формул (19) и (20), воспользоваться результатами предыдущего расчета, см. формулы (1) и (4).

Сопротивление растеканию горизонтальной сетки с учетом экранирования и климатического района:

$$R_{з. г.} = \frac{R_g * K_g}{\eta_g} = \frac{2,91 * 4}{0,31} = 37,5 \text{ Ом} \quad (26)$$

где

- $K_g=4$ – поправочный коэффициент (для горизонтальных заземлителей), учитывающий изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от климатического района, см. табл.8-2 справочника; взято значение середины рекомендуемого интервала 3,5-4,5;
- $\eta_g=0,31$ – коэффициент использования сетки, см. табл.8-7 справочника; значение вычислено с помощью метода линейной интерполяции.

Примечание.

В названии таблицы 8-7 допущена ошибка. Правильное название «Коэффициенты использования Ки.г.зм ~~вертикальных~~ горизонтальных соединительных электродов в контуре из вертикальных электродов».

Полное сопротивление растеканию заземляющего устройства:

$$R_z = \frac{R_{з. в.} * R_{з. г.}}{R_{з. в.} + R_{з. г.}} = \frac{6,6 * 37,5}{6,6 + 37,5} = 5,6 \text{ Ом} \quad (27)$$

Заземляющее устройство в двухслойном грунте.

В справочнике под общ. ред. Федорова и Сербиновского так же, как и в справочнике под ред. Барыбина, отсутствует методика расчета сопротивления заземляющего устройства в двухслойном грунте, поэтому воспользуемся уже описанной выше методикой определения эквивалентного удельного сопротивления грунта (см. расчет по справочнику под ред. Ю.Г. Барыбина в этой статье).

Согласно предыдущим расчетам, $r_{экв}=109,5$ Ом, см. формулу (9).

Подставляя значение $r_{экв}$ в формулы (22) и (25), определяем R_v и R_g , а затем по остальным формулам вычисляем R_z . Результаты расчетов представлены ниже.

$$R_v = \frac{109,5}{2 * 3,14 * 5} * \left(\ln \frac{2 * 5}{0,025} + \frac{1}{2} * \ln \frac{4 * 3,2 + 5}{4 * 3,2 - 5} \right) = 22,3 \text{ Ом} \quad (28)$$

$$R_{з.в.} = \frac{20,4 * 1,65}{15 * 0,51} = 4,8 \text{ Ом} \quad (29)$$

$$R_{г} = \frac{109,5}{2 * 3,14 * 110} * \ln \frac{110^2}{0,025 * 0,7} = 2,13 \text{ Ом} \quad (30)$$

$$R_{з.г.} = \frac{2,13 * 4}{0,31} = 27,5 \text{ Ом} \quad (31)$$

$$R_{з} = \frac{4,8 * 27,5}{4,8 + 27,5} = 4,1 \text{ Ом} \quad (32)$$

Итак, полное сопротивление растеканию заземляющего устройства в двухслойном грунте равно 4,1 Ом.

Расчет заземляющего устройства по справочнику Р.Н.Карякина, 2006 г.

Заземляющее устройство в однослойном грунте.

В справочнике Р. Н. Карякина [3] отдельный акцент ставится на определении сопротивления грунта:

«Электропроводность породы, если она не содержит высоких концентраций проводящих минералов, при обычных температурах определяется количеством присутствующей в ней воды, минерализацией воды и характером распределения воды в породе... Удельное электрическое сопротивление породы зависит также от температуры. Для водосодержащих пород влияние температуры на сопротивление породы такое же, как и влияние температуры на электросопротивление находящейся в породе воды в интервале температур между точками ее замерзания и кипения».

Согласно формуле (3.2) справочника, изменения сопротивления, вызванные температурными изменениями в растворе электролита, приближенно выражаются формулой

$$\rho_T = \rho_{20} * e^{-0,022*(T-20)} \quad (33)$$

где ρ_T , ρ_{20} – сопротивления при T° и 20° С, соответственно.

Согласно справочнику под ред. Барыбина [1], для второго климатического района характерна средняя многолетняя температура (январь) в диапазоне $-14...-10^\circ$ С. Для расчетов используем значение $T=-12^\circ$ С.

$$\rho_T = 150 * e^{-0,022*(-12-20)} = 303 \text{ Ом} * \text{м} \quad (34)$$

Удельное сопротивление грунта увеличилось в 2,02 раза. Это несколько больше поправочного коэффициента для стержневых вертикальных электродов $K_v=1,45$ из табл.7.7 [1], но и меньше поправочного коэффициента для горизонтальных заземлителей $K_g=3,5$ этой же таблицы. По справочнику под общ. ред. Федорова и Сербиновского, табл.8-2, эти коэффициенты равны $K_v=1,5...1,8$; $K_g=3,5...4,5$.

Следует заметить, что с увеличением глубины грунта его температура повышается, соответственно, используя формулу (33) можно посчитать удельное сопротивление грунта на разной глубине в зависимости от температуры грунта. Проблема заключается в том, что в формуле расчета сопротивления заземляющего устройства в однослойном грунте никак нельзя учесть это различие удельных сопротивлений. Получается, что проблема решается только переходом к методике расчета двухслойного грунта, в которой можно будет учесть различие удельного сопротивления слоев однородного грунта при разных температурах. В то же время, при расчете сопротивления ЗУ по методике однослойного грунта, в результате получим значения, несколько превышающие значения, полученные при расчете по методике двухслойного грунта, а значит, это создает некоторый запас прочности разрабатываемых проектных решений.

В общем случае, сопротивление сложного заземлителя, состоящего из горизонтальной сетки и вертикальных электродов, определяются выражением

$$R_z = \frac{\rho_T}{\pi * L_g} * \frac{\lambda * C_{11} * C_{22} - C_{12}^2}{C_{11} + \lambda * C_{22} - 2 * C_{12}} \quad (35)$$

где

$$\lambda = \frac{L_g}{\pi * L_v} = \frac{110}{15 * 5} = 1,47 \quad (36)$$

а C_{11} , C_{22} и C_{12} – коэффициенты для расчета сложных заземлителей, определяемых по формулам табл.3.9 справочника [3].

Примечание.

В формуле расчета R_3 (3.5) справочника Карякина Р. Н. содержится ошибка. В знаменателе вместо общей длины горизонтального заземлителя L_g указана длина одиночного вертикального электрода L_v . Эта ошибка повторяется также в справочнике по молниезащите, выпущенном в 2005 году. Правильная формула указана в справочнике Р. Н. Карякина «Заземляющие устройства электроустановок», Москва-2002 г., формула (3.5). В несколько другой, но также правильной, форме эта формула отображена в книге Р. Н. Карякина «Нормы устройства сетей заземления», Москва-2002 г., см. главу 8.18. В формуле (35) данной статьи ошибка исправлена.

Формулы для расчета коэффициентов сложных заземлителей выглядят следующим образом:

- коэффициент для расчета сопротивления горизонтальной сетки

$$C_{11} = \ln \frac{4 * L_g}{\sqrt{T} * d} + k_1 * \frac{L_g}{\sqrt{S}} - k_2 = \ln \frac{4 * 110}{\sqrt{0,7} * 0,025} + 1,22 * \frac{110}{\sqrt{200}} - 5,3 = 12,3 \quad (37)$$

- коэффициент для расчета сопротивления вертикальных электродов

$$C_{22} = \frac{1}{2} * \left(\ln \frac{8 * L_v}{d} - 1 + \frac{2 * k_1 * L_v}{\sqrt{S}} * (\sqrt{n} - 1) \right) = \\ = \frac{1}{2} * \left(\ln \frac{8 * 5}{0,025} - 1 + \frac{2 * 1,22 * 5}{\sqrt{200}} * (\sqrt{15} - 1) \right) = 6,75 \quad (38)$$

- коэффициент для расчета взаимного сопротивления между горизонтальной сеткой и вертикальными электродами

$$C_{12} = \ln \frac{4 * L_g}{L_v} + k_1 * \frac{L_g}{\sqrt{S}} - k_2 + 1 = \ln \frac{4 * 110}{5} + 1,22 * \frac{110}{\sqrt{200}} - 5,3 + 1 = 9,67 \quad (39)$$

где $k_1=1,22$ и $k_2=5,3$ – находятся по зависимостям $k_1(\epsilon)$ и $k_2(\epsilon)$, см. рис.3.1 и рис.3.2 справочника; $\epsilon=A/B=20/10=2$ (A и B – размеры горизонтальной сетки, см. постановку задачи).

Воспользовавшись формулой (35), рассчитаем сопротивление R_3

$$R_3 = \frac{\rho_T}{\pi * L_g} * \frac{\lambda * C_{11} * C_{22} - C_{12}^2}{C_{11} + \lambda * C_{22} - 2 * C_{12}} = \frac{303}{\pi * 110} * \frac{1,47 * 12,3 * 6,75 - 9,67^2}{12,3 + 1,47 * 6,75 - 2 * 9,67} = 8,7 \text{ Ом} \quad (40)$$

Итак, сопротивление растекания заземляющего устройства в однослойном грунте равно 8,7 Ом.

Это значение намного превышает результаты расчетов, выполненных по методикам, описанным в справочниках [1] и [2] – 4,93 Ом и 5,6 Ом соответственно. Проанализировать причину такого несоответствия значения по приведенным формулам довольно затруднительно. Для разбора ситуации лучше воспользоваться книгой Р. Н. Карякина «Нормы устройства сетей заземления», Москва-2002 г. [4], которая уже упоминалась выше.

Согласно главе 8.18 [4], сопротивление растеканию заземляющего устройства, выполненного в виде контурного заземлителя, состоящего из горизонтальной сетки и вертикальных электродов, рассчитывается по формуле

$$R_3 = \frac{R_{11} * R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2 * R_{12}} \quad (41)$$

где R_{11} – сопротивление растеканию горизонтальной сетки, Ом;

R_{22} – сопротивление растеканию вертикальных электродов, Ом;

R_{12} – взаимное сопротивление между горизонтальной сеткой и вертикальными электродами, Ом.

Формулы расчета R_{11} , R_{22} и R_{12} (см. [4], гл.8.18) в точности повторяют суть коэффициентов C_{11} , C_{22} и C_{12} . Единственная разница заключается в замене коэффициентов k_1 и k_2 их приближенными значениями 1,37 и 5,6, соответственно. Если формулы расчета R_{11} , R_{22} и R_{12} подставить в выражение (41), то получим выражение (35).

Сравнивая выражение (41) с выражением (6), увидим, что эти выражения очень похожи. Различия методик расчета, описанных в [1] и [2] отличается от методики расчета [3] следующим:

- при расчете сопротивления отдельных видов заземлителей – горизонтального и вертикальных – в [1] и [2] применяются коэффициенты использования; эти коэффициенты учитывают влияние заземлителей друг на друга;
- в [3] для учета взаимного влияния отдельных видов заземлителей применяется понятие взаимного сопротивления этих заземлителей, а коэффициенты использования не применяются.

Произведем расчет сопротивлений R_{11} , R_{22} и R_{12} , используя ранее рассчитанные коэффициенты C_{11} , C_{22} и C_{12} .

$$R_{11} = \frac{\rho_T}{\pi * L_{\Gamma}} * C_{11} = \frac{303}{3,14 * 110} * 12,3 = 10,8 \text{ Ом} \quad (42)$$

$$R_{22} = \frac{\rho_T}{\pi * n * L_B} * C_{22} = \frac{303}{3,14 * 15 * 5} * 6,75 = 8,7 \text{ Ом} \quad (43)$$

$$R_{12} = \frac{\rho_T}{\pi * L_{\Gamma}} * C_{12} = \frac{303}{3,14 * 110} * 9,67 = 8,5 \text{ Ом} \quad (44)$$

Примечание.

В формуле расчета R_{22} (гл.8.18) справочника [4] содержится ошибка. В знаменателе вместо длины одиночного вертикального заземлителя L_B указана суммарная длина электродов горизонтальной сетки L_{Γ} .

Также, наблюдается несовпадение в формулах расчета C_{11} , C_{12} по [3] и соответствующих этим коэффициентам частей формул расчета R_{11} и R_{12} в гл.8.18 [4]. Сравните (обратите внимание на числитель дроби под логарифмом):

$$C_{11} = \ln \frac{4 * L_{\Gamma}}{\sqrt{T} * d} + k_1 * \frac{L_{\Gamma}}{\sqrt{S}} - k_2 \quad (45)$$

и

$$R_{11} = \frac{\rho_T}{\pi * L_{\Gamma}} * \left(\ln \frac{2 * L_{\Gamma}}{\sqrt{T} * d} + k_1 * \frac{L_{\Gamma}}{\sqrt{S}} - k_2 \right) \quad (46)$$

а также,

$$C_{12} = \ln \frac{4 * L_{\Gamma}}{L_B} + k_1 * \frac{L_{\Gamma}}{\sqrt{S}} - k_2 + 1 \quad (47)$$

и

$$R_{12} = \frac{\rho_T}{\pi * L_{\Gamma}} * \left(\ln \frac{2 * L_{\Gamma}}{L_B} + k_1 * \frac{L_{\Gamma}}{\sqrt{S}} - k_2 + 1 \right) \quad (48)$$

Какие формулы являются правильными определить затруднительно, т.к. автор не приводит вывод этих формул. Будем опираться на справочники более позднего издания этого автора, т.е.

на [3], см. формулы (41)-(43) этой статьи.

Произведем расчет R_3 , согласно формуле (41)

$$R_3 = \frac{R_{11} * R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2 * R_{12}} = \frac{10,8 * 8,7 - 8,5^2}{10,8 + 8,7 - 2 * 8,5} = 8,7 \text{ Ом} \quad (49)$$

Расчеты R_3 по формулам (40) и (49) совпадают, что подтверждает их тождественность.

Из любопытства, сравним сопротивления группы вертикальных и горизонтального заземлителей, рассчитанных по разным методикам. Чтобы поставить методики в равные условия, примем удельное сопротивление земли равным $\rho_T=303 \text{ Ом*м}$.

Сопротивление группы вертикальных заземлителей по справочнику [1] без учета коэффициента использования и поправочного коэффициента на климатический район выглядит следующим образом, см. формулы (1) и (3) этой статьи

$$R_B = \frac{0,366 * \rho_T}{L_B} * \left(\lg \frac{2 * L_B}{d} + \frac{1}{2} * \lg \frac{4 * t + L_B}{4 * t - L_B} \right) =$$
$$= \frac{0,366 * 303}{5} * \left(\lg \frac{2 * 5}{0,025} + \frac{1}{2} * \lg \frac{4 * 3,2 + 5}{4 * 3,2 - 5} \right) = 61,7 \text{ Ом} \quad (50)$$

$$R_{3.в.} = \frac{R_B}{n} = \frac{61,7}{15} = 4,1 \text{ Ом} \quad (51)$$

Сопротивление горизонтальной сетки по справочнику [1] без учета коэффициента использования и поправочного коэффициента на климатический район выглядит следующим образом, см. формулу (4) этой статьи

$$R_\Gamma = \frac{0,366 * \rho_T}{L_{\text{сум.г.}}} * \lg \frac{L_{\text{сум.г.}}^2}{d * \Gamma} = \frac{0,366 * 303}{110} * \lg \frac{110^2}{0,025 * 0,7} = 5,9 \text{ Ом} \quad (52)$$

Если сравнить результаты (51) и (43), то видно, что, по сути, одни и те же величины $R_{22}=8,7 \text{ Ом}$ и $R_{3.в.}=4,1 \text{ Ом}$ отличаются значительно. Аналогично с результатами расчетов по формулам (42) и (52) — $R_{11}=10,8 \text{ Ом}$ и $R_\Gamma=5,9 \text{ Ом}$. На основании этого можно сделать вывод, что методика Р. Н. Карякина отличается от методик, приведенных в справочниках под ред. Барыбина [1] и под общ. ред. Федорова и Сербиновского [2], уже на стадии расчета сопротивления отдельных заземлителей; при этом не учитывались отличия в рекомендациях к поправочному коэффициенту для расчета удельного сопротивления грунта, а также, коэффициентов использования каждого вида заземлителей.

Заземляющее устройство в двухслойном грунте.

В справочнике Р. Н. Карякина [3] есть методика расчета в двухслойном грунте. К сожалению, одно из принятых допущений гласит:

«контурный заземлитель, образованный из горизонтальных полос и вертикальных электродов, целиком расположен в верхнем слое земли».

Согласно этому допущению, расчет сопротивления заземляющего устройства по справочнику [3] нельзя проводить для нашей задачи, т.к. ЗУ расположено частично в верхнем и частично в нижнем слое. Тем не менее, попробуем пренебречь этим допущением, и выполним расчет сопротивления ЗУ в двухслойном грунте.

Для верхнего слоя удельное сопротивление грунта с учетом промерзания до -12 град.С уже посчитано и равно $\rho_{1T}=303 \text{ Ом*м}$, см. (34). Будем считать, что температура нижнего слоя грунта будет равна 0

град.С.

Тогда

$$\rho_{2T} = \rho_{220} * e^{-0,022*(T-20)} = 100 * e^{-0,022*(0-20)} = 155 \text{ Ом} * \text{м} \quad (53)$$

При расчете сопротивления растекания ЗУ также, как и в предыдущих расчетах для двухслойного грунта, используется понятие эквивалентного электрического сопротивления двухслойного грунта.

Для нашего случая ($\rho_{1T} > \rho_{2T}$) выражение расчета рэкв примет вид (см. [3], формула 3.51):

$$\rho_{\text{экв}} = \rho_{1T} * (1 - e^{-3,7*\Delta}) + \rho_{2T} * \left(1 - e^{-\frac{\beta}{\Delta}}\right) \quad (54)$$

где

$$\Delta = \frac{H1}{\sqrt{S}} = \frac{2}{\sqrt{200}} = 0,14 \quad (55)$$

$$\beta = -2,3 * \Delta * \lg(1 - e^{-3,7*\Delta}) = -2,3 * 0,14 * \lg(1 - e^{-3,7*0,14}) = 0,13 \quad (56)$$

Подставляя результаты вычислений (55) и (56) в (54), получим

$$\rho_{\text{экв}} = 303 * (1 - e^{-3,7*0,14}) + 155 * \left(1 - e^{-\frac{0,13}{0,14}}\right) = 215,5 \text{ Ом} * \text{м} \quad (57)$$

Согласно [3], формуле (3.49), сопротивление растеканию контурного заземлителя равно

$$R_3 = \frac{0,52 * \rho_{\text{экв}}}{\sqrt{S}} = \frac{0,52 * 215,5}{\sqrt{200}} = 7,9 \text{ Ом} \quad (58)$$

В справочнике заявляется, что ошибка расчета сопротивления растеканию по этой методике не превышает 30% при доверительной вероятности, равной 0,999.

Следует заметить, что при расчете R_3 по формуле (58) не учитывалась конфигурация ЗУ – длина горизонтальных и вертикальных заземлителей, глубина их нахождения в грунте и т.д. С другой стороны, все эти параметры учитывались при расчете R_3 однослойного грунта. Попробуем воспользоваться отработанной методикой для расчета ЗУ однослойного грунта, и применить ее для расчета R_3 двухслойного грунта. Тогда, согласно формуле (40), величина R_3 будет рассчитываться следующим образом

$$R_3 = \frac{\rho_{\text{экв}}}{\pi * L_{\Gamma}} * \frac{\lambda * C11 * C22 - C12^2}{C11 + \lambda * C22 - 2 * C12} = \frac{215,5}{\pi * 110} * \frac{1,47 * 12,3 * 6,75 - 9,67^2}{12,3 + 1,47 * 6,75 - 2 * 9,67} = 6,2 \text{ Ом} \quad (59)$$

Полученный результат $R_3=6,2$ Ом по формуле (59) на 22% меньше, чем результат $R_3=7,9$ Ом, полученный по формуле (58). Чем вызваны такие различия в результатах, я объяснить затрудняюсь. Собственно, если принять к сведению предупреждение автора о том, что ошибка расчета по формуле (58) не превышает 30%, тогда это укладывается в общую теорию. Хотя, я думаю, говоря об ошибке, автор подразумевал расхождение расчетов с натурными измерениями, а не различие в расчетах по разным формулам. И все-таки, наблюдается слишком большой разброс результатов расчетов, учитывая, что расчеты проводятся по одному и тому же справочнику.

Выводы

1. Результаты расчета сопротивления растеканию заземляющего устройства по методикам справочника под ред. Ю. Г. Барыбина [1] и справочника под общ. ред. Федорова и Сербиновского [2] практически совпадают. Отличия наблюдаются в следующем:

- в [1] алгоритм расчета предназначен для нахождения сопротивления по известной конфигурации заземляющего устройства, а в [2] - для определения конфигурации ЗУ по заданному значению сопротивления растеканию; между тем, формулы используются одни и те же в обоих методиках;
- отличаются табличные данные поправочных коэффициентов для расчета удельного сопротивления грунта в зависимости от климатического района;
- отличается написание формул расчета одиночных заземлителей, хотя с математической точки зрения эти формулы тождественны.

С учетом приведенных в справочниках рекомендаций, величина результата расчета по [1] получается несколько меньше, чем по [2]. В обоих справочниках отсутствует методика расчета сопротивления заземляющего устройства для двухслойного грунта.

2. Методика расчета по справочнику Р. Н. Карякина [3] несколько отличается от методик, приведенных в [1] и [2]. Из-за этого методики можно сравнить только по результатам полученного расчета, и нет возможности сравнить промежуточные величины. Сопротивление ЗУ, полученное по методике [3] значительно превышает значения, полученные по методикам [1] и [2]. В справочнике Р. Н. Карякина есть методика для расчета заземляющего устройства, находящегося в двухслойном грунте, но, к сожалению, одно из допущений требует, чтобы ЗУ целиком располагалось в верхнем слое грунта. В данной статье выполнены расчеты с нарушением этого допущения.

3. В таблице сведены результаты расчета сопротивления заземляющего устройства по всем методикам.

Наименование справочника	Rз, Ом для однослойного грунта	Rз, Ом для двухслойного грунта
под ред. Ю. Г. Барыбина	4,93	3,6
под общ. ред. Федорова и Сербиновского	5,6	4,1
автор Р. Н. Карякин	8,7	7,9 (6,2*)

* — альтернативное значение сопротивления, рассчитанное по формуле из справочника, но не рекомендуемое автором справочника.

4. Для выполнения расчетов комбинированного заземляющего устройства автор этой статьи рекомендует воспользоваться методикой из справочников [1] или [2]. К сожалению, по справочнику Р. Н. Карякина значение сопротивления ЗУ получается слишком завышенным.