

УДК 621.316.99

И. А. ПАВЛОВИЧ, С. М. БАРАЙШУК, В. В. БОГДАНОВИЧ

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА, ВЫПОЛНЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРУНТОЗАМЕЩАЮЩЕЙ СМЕСИ, ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТА

*Белорусский государственный аграрный технический университет**Поступила 25.10.2023*

В работе рассмотрены методики расчета сопротивления растеканию тока заземляющего устройства и проведено сравнение результатов таких расчетов с экспериментальными данными. Показано, что рекомендации и алгоритмы расчета сопротивления заземляющих устройств (ЗУ), представленные в известной справочной литературе и нормативно-правовой документации, не корректно описывают заземляющие устройства, смонтированные в неоднородном грунте, в частности, показано, что такой фактор, как пропорциональное отношение грунтов с разным удельным сопротивлением практически не влияет на конечный результат. Данный факт вводит специалистов в заблуждение, поскольку при применении той или иной методики, используемой для расчетов заземляющего устройства, получаются результаты, существенно отличающиеся от наблюдаемого на практике. В данной работе приведены расчеты сопротивления заземляющего устройства и на их основе предложена методика расчета заземляющего устройства при использовании грунтозамещающей смеси. Приведены расчеты сопротивления ЗУ разными методиками и сравнение их результатов с экспериментальными. Показана хорошая сходимость результатов с экспериментальными данными, определено дальнейшее направление в оптимизации методик расчетов заземляющих устройств.

Введение. В настоящее время наблюдается бурный рост работ по строительству новых и реконструкции функционирующих, или вышедших из строя, смонтированных ранее заземляющих устройств (ЗУ). Это обусловлено как возросшими требованиями к обеспечению защиты от поражения электрическим током, так и более жесткими нормами к эффективности контуров рабочего заземления, особенно для устройств и установок цифровой инфраструктуры. Это вызвало активизацию разработок в направлении повышения надежности и эффективности систем заземления, которые, по большей части, проводятся инженерными работниками частных компаний, мало систематизированы и направлены на уменьшение

сопротивления, материалоемкости и коэффициента сезонности. Влияние коэффициента сезонности при расчете сопротивления ЗУ очень значительно [1].

Традиционные методы расчета [2] и проектирования заземляющих устройств не всегда соответствуют тому, что происходит на практике. Более того, эмпирические коэффициенты, использованные в них и полученные без компьютерных и статистических расчетов, дают значительное расхождение при одинаковых начальных условиях. В нашей работе на примере экспериментальных контуров рассмотрена сходимость таких расчетов с экспериментальными измеренными значениями реальных заземляющих устройств и предложен алгоритм расчета, учитывающий применение грунтозамещающих смесей для монтажа ЗУ.

Экспериментальная часть. В большинстве источников [1; 2] удельное сопротивление грунта при расчетах и проектировании рекомендуется принимать по данным замеров, а при отсутствии таких данных – воспользоваться табличными значениями [1–3].

Для проверки сходимости экспериментальных данных с известными методиками нами были изучены ранее построенные заземляющие устройства, состоящие из одного вертикального и горизонтального заземлителя. Чтобы сравнение методик было более корректным и не зависело от различий в табличных данных, удельное сопротивление грунта также определялось экспериментально, и было равным $\rho = 537 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Удельное сопротивление получается умножением удельного сопротивления, измеренного в нормальных условиях, на поправочные коэффициенты, учитывающие сезонность [2; 3]. В нашем случае было принято удельное сопротивление в момент проведения измерений при средней температуре окружающего воздуха $+22 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности грунта около 15 %. Лабораторные измерения осуществлялись при температуре от $+20$ до $+24 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности образцов грунтозамещающей смеси 15 %. Далее, для определения коэффициента сезонности измерения экспериментального ЗУ проводились в течение нескольких лет при температуре от -12 до $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности грунта от 15 до 50 % в зависимости от погодных условий. Одновременно с ним проводили измерение сопротивления всех элементов конструкции заземляющего устройства. Это позволило получить как начальные данные, так и реальные значения сопротивления контура $R_{\text{кз}}$ и сравнивать его с расчетными при использовании различных методик. В качестве экспериментального использовали ЗУ аналогичной конструкции, состоящее из одного составного вертикального и одного горизонтального заземлителя. Составной вертикальный заземлитель выполнен из двух соединенных между собой металлических прутков диаметром 0,018 м, общей длиной 3 м. Горизонтальный заземлитель выполнен из полосы $4 \times 40 \text{ мм}$, расстояние до поверхности 0,5 м, удельное сопротивление смеси 0,8 Ом·м, коэффициент сезонности грунта $\varphi = 2$ взят из [4], коэффициент сезонности смеси $\varphi = 1,48$; на каждые 3 м заземлителя применяли 0,02 м³ смеси.

Сопротивление контрольного ЗУ – 380 Ом. Сопротивление ЗУ, смонтированного с применением грунтозамещающей смеси, 114 Ом.

Измерения производили двумя поверенными приборами ИС-10 (Радиосервис) и MRU-1 (Sonel) по методикам, указанным производителями оборудования. Измерительные приборы подключались в точке соединения горизонтального и вертикального электродов, так как именно в этой точке происходит присоединение электроустановок к ЗУ.

Проведенные измерения позволили произвести сравнение методик, оценив погрешность каждой из них.

Сравнение методик расчетов. В [5] предлагается рассчитать сопротивление растекания отдельно для горизонтальных и вертикальных электродов. Результирующее сопротивление заземляющего устройства рассчитывается из допущения, что данную конфигурацию системы электродов можно рассматривать как параллельное соединение проводников.

Сопротивление одного вертикального электрода R_B определяется по формулам, приведенным в [6, табл. 7.9]. Применительно к нашему случаю, формула примет вид

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

где t_B – глубина заложения вертикального электрода (считается расстояние от поверхности земли до середины электрода).

Подставив в (1) экспериментально полученные значения для нашего контура получим

$$R_B = 188,03 \text{ Ом.}$$

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

$$R_{з.в} = \frac{R_B \cdot K_B}{\eta \cdot \eta_B}, \quad (2)$$

где $K_B = 1,45$ – поправочный коэффициент (для вертикальных заземлителей), учитывающий изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от климатического района; $\eta_B = 0,51$ – коэффициент использования вертикальных электродов (без учета влияния полосы связи), для случая «Трубы размещены по контуру» при отношении расстояния между электродами к длине электрода $L_r / L_B = 5 / 5 = 1$; значение вычислено с помощью метода линейной интерполяции для средних значений интервальных табличных данных.

Коэффициенты использования взяты в [5, табл. 7.7, 7.10, 7.12] и подставлены в (2):

$$R_{з.в} = 534,62 \text{ Ом.}$$

Сопротивление горизонтальных электродов может быть определено следующим образом:

$$R_{\Gamma} = \frac{0,366\rho}{L_{\text{сум.г}}} \lg \frac{L_{\text{сум.г}}^2}{dT},$$

$$R_{\Gamma} = 207,9 \text{ Ом.}$$

Сопротивление горизонтальной сетки с учетом экранирования и климатического района

$$R_{3,\Gamma} = \frac{R_{\Gamma} \cdot K_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}};$$

$$R_{3,\Gamma} = 2346,71 \text{ Ом,}$$

где $K_{\Gamma} = 3,5$ – поправочный коэффициент (для горизонтальных заземлителей), учитывающий изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от климатического района; $\eta_{\Gamma} = 0,31$ – коэффициент использования электродов [5]; значение вычислено с помощью метода линейной интерполяции.

Полное сопротивление растеканию заземляющего устройства:

$$R_3 = \frac{R_{3,\text{в}} K_{3,\Gamma}}{R_{3,\text{в}} + K_{3,\Gamma}}.$$

Полное сопротивление заземляющего устройства равно $R_3 = 405,42$ Ом.

Произведем аналогичный расчет по методике, представленной в [6].

В этой работе расчет заземляющего устройства основан на тех же принципах и допущениях, что и в работе [5], но есть несколько отличий, на которых следует остановиться. Первое отличие заключается в том, что производится не расчет сопротивления R_3 по заданной конфигурации ЗУ, а, наоборот, по заданному сопротивлению растекания R_3 определяется количество вертикальных электродов, следовательно, и конфигурация всего заземляющего устройства. Если эти же формулы использовать для нахождения R_3 , выразив соответствующие величины, то порядок и вид расчетов принципиально не будет отличаться от методики, предложенной в [5]. Поэтому, для корректного сравнения, выполним все расчеты в том же порядке, что и предыдущие.

Второе отличие заключается в несовпадении табличных данных для различных климатических зон. Следует заметить, что изменение этих коэффициентов серьезно влияет на результат расчета. В [6] значения коэффициентов указаны более высокие, чем в [5], следовательно, при одной и той же конфигурации заземляющего устройства сопротивление ЗУ будет выше при расчете, алгоритм которого указан в [6].

Третье отличие заключается в математических преобразованиях для каждой формулы расчета сопротивления растекания одиночных электродов. Так, в работе [6]:

для вертикального электрода

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi L_B} \left(\ln \frac{2L_B}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_B + L_B}{4t_B - L_B} \right), \quad (3)$$

для горизонтального электрода

$$R_G = \frac{\rho}{2\pi L_{\text{сум.г}}} \ln \frac{L_{\text{сум.г}}^2}{dT}. \quad (4)$$

Очевидно, что с математической точки зрения формулы (1) и (3), а также (2) и (4) идентичны.

Действительно, если в формулах (3) и (4) выполнить переход от натурального основания логарифма к десятичному, то получим формулы (1) и (2). Этот переход как раз и объясняет непонятный коэффициент 0,366 в формулах из работы [5].

Следовательно, в формуле (1) коэффициент определяется выражением:

$$\frac{1}{2\pi \lg e} = 0,366.$$

Применительно к нашему случаю суммарное сопротивление заземляющего устройства по (2), состоящего из вертикального электрода, без учета сопротивления полосы; сопротивление растеканию горизонтальных электродов; суммарное сопротивление горизонтальных электродов с учетом экранирования и климатического района; полное сопротивление растеканию заземляющего устройства соответственно равны $R_B = 177,16$ Ом; $R_{з.в} = 503,7$ Ом; $R_G = 196,7$ Ом; $R_{з.г} = 2537,62$ Ом. Полное сопротивление заземляющего устройства рассчитанное по этой методике $R_3 = 369,8$ Ом.

В [7] отдельный акцент ставится на определении сопротивления грунта. Авторы указывают, что электропроводность грунта, если он не содержит высоких концентраций проводящих веществ, при обычных температурах определяется количеством присутствующей в ней воды, ее минерализацией и характером распределения воды в породе, а также зависит от температуры. Таким образом, в работе изначально заложено указание на то, что с современными материалами, такими как грунтозамещающие смеси для оптимизации электрофизических параметров заземления, минеральными солями, углеродсодержащими смесями, она не будет корректно работать. Необходимо ее доработать, с учетом изменения $\rho_{уд}$ грунта в местах заложения грунтозамещающей смеси, а так же допустимых колебаний сопротивления контура ЗУ в зависимости от температуры, такие были приведены в [8].

Согласно формуле (3.2) работы [7], изменения сопротивления, вызванные температурными изменениями в растворе электролита, приближенно выражаются формулой

$$\rho_T = \rho_{20} e^{-0,022(T-20)}, \quad (5)$$

где ρ_T , ρ_{20} – удельные сопротивления при данной температуре T и 20°C соответственно.

Согласно справочным данным, приведенным в [5], для второго климатического района характерна средняя многолетняя температура (январь) в диапазоне $-14 \dots -10^\circ\text{C}$. Для расчетов используем среднее значение $T = -12^\circ\text{C}$.

Удельное сопротивление грунта увеличилось в 2,02 раза. Это несколько больше поправочного коэффициента для стержневых вертикальных электродов $K_B = 1,45$, но и меньше поправочного коэффициента для горизонтальных заземлителей $K_G = 3,5$ из [4, табл. 7.7]. По [6, табл. 8-2] эти коэффициенты равны $K_B = 1,5-1,8$; $K_G = 3,5-4,5$.

Следует заметить, что с увеличением глубины грунта его температура в зимний период повышается, соответственно, используя формулу (5) можно посчитать удельное сопротивление грунта на разной глубине в зависимости от его температуры. Проблема заключается в том, что в формуле расчета сопротивления заземляющего устройства в однослойном грунте никак нельзя учесть это различие удельных сопротивлений. Получается, что таким методом задача может быть решена только переходом к методике расчета многослойного 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, превышающие значения, полученные при расчете по методике многослойного грунта, это создает запас на рост сопротивления при проектировании заземляющих устройств.

В общем случае, сопротивление сложного заземлителя, состоящего из горизонтальной полосы, в узлах которой размещены вертикальные электроды, определяется выражениями

$$R_3 = \frac{\rho_T}{\pi L_G} \frac{\lambda C_{11} C_{22} - C_{12}^2}{C_{11} + \lambda C_{22} - 2 C_{12}}, \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{L_G}{n L_B} = \frac{3}{1 \cdot 3} = 1,$$

где C_{11} , C_{22} и C_{12} – коэффициенты для расчета сложных заземлителей, определяемых по формулам, о. е.

Формулы для расчета коэффициентов сложных заземлителей выглядят следующим образом:

коэффициент для расчета сопротивления горизонтальной сетки:

$$C_{11} = \ln \frac{4L_{\Gamma}}{\sqrt{Td}} + K_1 \frac{L_{\Gamma}}{\sqrt{AB}} - K_2,$$

коэффициент для расчета сопротивления вертикальных электродов:

$$C_{22} = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{8L_B}{d} - 1 \frac{2k_1 L_B}{\sqrt{S}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right),$$

коэффициент для расчета взаимного сопротивления между горизонтальными и вертикальными электродами:

$$C_{12} = \ln \frac{4L_{\Gamma}}{L_B} + k_1 \frac{L_{\Gamma}}{\sqrt{S}} - k_2 + 1,$$

где $k_1 = 1,22$ и $k_2 = 5,3$ – находятся по зависимостям $k_{1(e)}$ и $k_{2(e)}$ [3, рис. 3.1 и 3.2]; $\varepsilon = A / B = 20 / 10 = 2$ (A и B – размеры монтажной площадки).

Результаты расчета коэффициентов сложных заземлителей:

$$C_{11} = 1,85; C_{22} = 3,30; C_{12} = -0,80.$$

Воспользовавшись формулой (6), рассчитаем сопротивление R_3 :

$$R_3 = 93,61 \text{ Ом.}$$

Итак, сопротивление растекания заземляющего устройства в однослойном грунте равно 93,61 Ом.

Это значение существенно ниже ранее рассчитанных значений по методикам [5] и [6], и ниже реальных значений, полученных на практике. Однако ни одна из таких методик достаточно хорошо не описывает расчет сопротивления ЗУ с применением грунтозамещающей смеси, которое составляет 150 Ом.

Расчет сопротивления заземляющего устройства с условием применения грунтозамещающих смесей. В настоящее время при монтаже и ремонте заземляющих устройств активно используют обратную засыпку так называемыми компенсирющими смесями. Такое решение достаточно широко известно [9] и используется в том числе и авторами работы. Однако ни одна из приведенных ранее методик не позволяет оценить сопротивление ЗУ при применении таких смесей. Наиболее распространенный и известный способ оценки сопротивления при использовании грунтозамещающей смеси приведен в [8]. В этой методике описан расчет контура заземления при засыпке его угольной крошкой, которая работает по сходному принципу. Далее представим результат расчета.

Сопротивление одиночного вертикального электрода в коксовой мелочи определяется по формуле

$$R_B = 0,37k_1 \frac{\rho}{l_B} \left(\ln \frac{2l_B}{d_{\text{ЭКВ}}} + 0,5 \ln \frac{4t_B + 3l_B}{4t_B + l_B} + \frac{\rho_{\text{акт}}}{\rho} \ln \frac{d_{\text{акт}}}{d_B} \right),$$

где k_1 – коэффициент промерзания, учитывающий сезонные колебания температуры грунта для вертикальных заземлителей; ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м; l_B – длина вертикального электрода, м; d_B – наружный диаметр электрода, м; t_B – средняя глубина установки электрода, равная расстоянию от поверхности земли до середины электрода, м; $d_{\text{ЭКВ}} = 0,95b$; $\rho_{\text{акт}}$ – удельное электрическое сопротивление коксовой мелочи, Ом·м; $d_{\text{акт}}$ – наружный диаметр коксовой засыпки, м.

Сопротивление одиночного горизонтального электрода или соединительной полосы в коксовой мелочи при $l_{\Gamma} \gg d_{\Gamma}$ и $t_{\Gamma} \ll l_{\Gamma} / 4$ определяется по формуле

$$R_{\Gamma} = 0,37k_2 \frac{\rho}{l_{\Gamma}} \left(\lg \frac{2l_{\Gamma}}{d_{\Gamma}} + \lg \frac{l_{\Gamma}}{2t_{\Gamma}} + \frac{\rho_{\text{акт}}}{\rho} \lg \frac{d_{\text{акт}}}{d_{\Gamma}} \right),$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м; k_2 – коэффициент промерзания, учитывающий сезонные колебания температуры грунта для горизонтальных заземлителей; l_{Γ} – длина горизонтального электрода, м; d_{Γ} – наружный диаметр электрода, м; t_{Γ} – глубина прокладки электрода, м; $\rho_{\text{акт}}$ – удельное электрическое сопротивление коксовой мелочи, Ом·м; $d_{\text{акт}}$ – наружный диаметр коксовой засыпки, м.

Сопротивление заземлителя

$$R_3 = \frac{R_{\Gamma} R_B}{\mu_1 R_B + \mu_2 n R_{\Gamma}},$$

где R_{Γ} – сопротивление одиночного горизонтального электрода или соединительной полосы, Ом; R_B – сопротивление одиночного вертикального электрода, Ом; μ_1 – коэффициент использования протяженных заземлителей (полосы); μ_2 – коэффициент использования вертикальных заземлителей; n – количество вертикальных заземлителей.

Произведя расчет по исходным данным, получили следующие значения: $R_B = 502,18$ Ом; $R_{\Gamma} = 243,26$ Ом; $R_{\text{общ}} = 163,88$ Ом, что на 43 % выше экспериментально полученных данных.

При частичной замене грунта вокруг электродов заземления сопротивление контура будет изменяться, но не значительно, что противоречит экспериментальным исследованиям. Это указывает на невозможность применения данной методики расчета при использовании грунтозамещающих смесей для оптимизации электрофизических параметров заземления, без введения поправочного коэффициента. Этот коэффициент должен отражать изменение удельного сопротивления грунта непосредственно в приэлектродной области.

Проведенные нами ранее исследования [8; 10; 11] показывают, что применение грунтозамещающей смеси снижает удельное сопротивление контура ЗУ за счет снижения удельного сопротивления грунта в месте монтажа ЗУ. Это дает возможность эмпирически описать снижение сопротивления ЗУ как величину, зависящую от изменения удельного сопротивления грунта:

$$\rho_{\text{экв}} = \rho_3 0,98 \frac{d_{\text{смеси}}}{d_3} \left(\frac{\rho_{\text{смеси}}}{\rho_3} \right)^{\frac{1}{3\pi}}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{экв}}$ – искомое расчетное удельное сопротивление, Ом·м; ρ_3 – удельное сопротивление грунта, Ом·м; $d_{\text{смеси}}$ – эквивалентный диаметр заземлителя и смеси $\left(d_{\text{смеси}} = \sqrt{\frac{V_{\text{смеси}}}{l}} \right)$, м; d_3 – диаметр заземлителя, м; $\rho_{\text{смеси}}$ – удельное сопротивление

смеси, Ом·м.

Данная формула проверена на образцах с различным содержанием компонентов и, соответственно, удельным сопротивлением. Сравнивая ее с представленной в [8] для коксовой мелочи и произведя необходимые расчеты и вычисления видно, что она более точно описывает влияние замены грунта на общее сопротивление заземляющего устройства.

Для примера, произведем расчет ЗУ с предложенным коэффициентом.

Сопротивление одиночного вертикального электрода:

$$R_{\text{в}} = \varphi \rho_{\text{экв}} \frac{1}{2\pi l_{\text{в}}} \left(\ln \frac{2l_{\text{в}}}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+1}{4t-1} \right),$$

где φ – экспериментальный коэффициент сезонности для смеси; $\rho_{\text{экв}}$ – удельное сопротивление грунта в месте заложения по (7), Ом·м; $l_{\text{в}}$ – длина вертикального заземлителя, м; t – расстояние до середины длины вертикального стержня от поверхности грунта, м.

Сопротивление одиночного горизонтального электрода:

$$R_{\text{г}} = \frac{\varphi \rho_{\text{экв}}}{2\pi l_{\text{г}}} \ln \frac{2l_{\text{г}}^2}{d_{\text{экв}} t_{\text{г}}},$$

где φ – экспериментальный коэффициент сезонности для смеси; $\rho_{\text{экв}}$ – удельное сопротивление грунта в месте заложения по (7), Ом·м; $t_{\text{г}}$ – расстояние до середины полосы от поверхности грунта, м; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр заземлителя (диаметр заземлителя или 0,95 ширины полосы в случае полосы).

Вначале рассчитаем эквивалентный диаметр смеси для одиночного вертикального электрода:

$$d_{\text{смеси}} = \sqrt{\frac{0,02}{3}} + 0,012 = 0,082 + 0,012 = 0,094 \text{ м.}$$

Затем эквивалентное удельное сопротивление грунта с учетом коэффициента сезонности смеси:

$$\rho_{\text{экр}} = 537 \cdot 0,98^{0,012} \left(\frac{50}{500} \right)^{\frac{1}{3\pi}} = 356,28 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

После этого рассчитываем сопротивление вертикального заземлителя с учетом изменения удельного сопротивления грунта и коэффициента сезонности смеси:

$$R_{\text{в}} = 1,48 \frac{356,28}{2\pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2 + 1}{4 \cdot 2 - 1} \right) = 131,18 \text{ Ом.}$$

Аналогично, как и для случая с вертикальным заземлителем вначале, рассчитаем эквивалентное удельное сопротивление грунта при замене части его смесью. Вначале рассчитаем эквивалентный диаметр смеси для горизонтального заземлителя:

$$d_{\text{смеси}} = \sqrt{\frac{0,02}{3}} + 0,04 = 0,082 + 0,04 = 0,122 \text{ м.}$$

Затем эквивалентное удельное сопротивление грунта с учетом коэффициента сезонности смеси:

$$\rho_{\text{экр}} = 500 \cdot 0,98^{0,018} \left(\frac{50}{500} \right)^{\frac{1}{3\pi}} = 437,29 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

После этого рассчитываем сопротивление горизонтального заземлителя с учетом изменения удельного сопротивления грунта и коэффициента сезонности смеси:

$$R_{\text{г}} = \frac{1,48 \cdot 407,16}{2\pi \cdot 3} \ln \frac{2 \cdot 3^2}{0,004 \cdot 0,504} = 503,02 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление контура заземления:

$$R_{\text{общ}} = 123,07 \text{ Ом.}$$

При применении смеси происходит частичная замена объема исходного грунта в околоэлектродном пространстве ЗУ на смесь с гораздо более низким удельным сопротивлением. Как видно, эффективность такой замены зависит от удельного сопротивления исходного грунта, удельного сопротивления смеси в рабочем состоянии и объема замены. Однако используя методику, приведенную в [12], мы видим, что расчетное сопротивление контура заземления крайне мало зависит от объема засыпки, что противоречит практике, поскольку очевидно, что параметром, влияющим на изменение удельного сопротивления, будет площадь соприкосновения смеси и исходного грунта, а в случае применения смеси по всей длине электрода – периметр контакта. Таким образом, с увеличением объема засыпки, должно изменяться и сопротивление контура ЗУ в целом. Это хорошо согласуется с предложенными нами формулами расчета для эквивалентного удельного сопротивления грунта. Применяя эти формулы совместно с методиками [5] или [6], получаются расчетные значения, совпадающие с экспериментом в пределах 10 %.

Заключение. Результаты расчета сопротивления растеканию заземляющего устройства по методикам работ [5] и [6] достаточно хорошо сходятся. Основные отличия наблюдаются в том, что в [5] алгоритм расчета предназначен для нахождения сопротивления по известной конфигурации заземляющего устройства, а в [6] для определения конфигурации ЗУ по заданному значению сопротивления. В этих методиках расчета заложены различные табличные данные поправочных коэффициентов для расчета удельного сопротивления грунта в зависимости от климатического района, однако в них отсутствует методика расчета сопротивления заземляющего устройства для двухслойного грунта. Сопротивление заземляющего устройства, полученное по методике [7], значительно превышает значения, полученные по методикам [5] и [6]. В [7] имеется методика для расчета заземляющего устройства, находящегося в двухслойном грунте, но, к сожалению, одно из допущений требует, чтобы ЗУ целиком располагалось в верхнем слое грунта.

Однако ни одна из приведенных методик не позволяет учитывать изменения $\rho_{уд}$ по примеру, полученному авторами эмпирическими коэффициентами или приведенными в [13]. Использование полученной в ходе экспериментальных исследований формулы совместно с методиками, изложенными в [5] и [6], позволяет достаточно точно описывать экспериментальные результаты, при этом сходимость результатов с экспериментальными данными в пределах 10 %, а результаты, полученные по методике расчета, представленной в [9], имеют расхождение более 40 %.

Таким образом, полученное на основе экспериментальных данных эмпирическое выражение для определения эффективного удельного сопротивления грунта позволяет адаптировать известные методики расчета в случае применения грунтозамещающих смесей и получить при этом достаточную сходимость с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № T22УЗБ-057).

Литература

1. Методические указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 35–750 кВ. Минск: Стандарт ГПО «Белэнерго», 2007. – 75 с.
2. Молниезащита зданий, сооружений и инженерных коммуникаций: СН 4.04.03–2020. Введ. 21.04.2021. Минск: Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2020. – 161 с.
3. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и тоководы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний: ТКП 339–2022 (33240). Введ. 20.12.2022. Минск: Мин-во энергетики Республики Беларусь, 2011. – 593 с.
4. Якобс А. И., Алимamedов М. Б. // Электричество. 1969. № 8. С. 47–51.
5. Барыбин Ю. Г. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
6. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Электрооборудование и автоматизация / сост.: Т. В. Анчарова, В. В. Каменева, А. А. Катарская; под общ. ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. – 624 с.
7. Карякин Р. Н. Заземляющие устройства электроустановок: справ. М.: Энергосервис, 2006. – 519 с.
8. Барайшук С. М. и др. // Агропанорама. 2021. № 5(147). С. 28–33.
9. IEEE Std 142 -2007 IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. – Approved 7 June 2007. – 225 p.
10. Драко М. А., Барайшук С. М., Павлович И. А. // Изв. высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 23 (1). С. 80–92.
11. Барайшук С. М., Павлович И. А., Кахоцкий М. И. // Эпоха науки. 2020. № 24. С. 87–93.
12. Карякин Р. Н. Нормы устройства сетей заземления. М.: Энергосервис, 2002. – 117 с.
13. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных узлов. М.: Издательство «Связь», 1971. – 80 с.

I. A. PAULOVICH, S. M. BARAISHUK, V. V. BOGDANOVICH

METHODS FOR CALCULATING THE RESISTANCE OF A GROUNDING DEVICE MADE USING A SOIL REPLACEMENT MIXTURE TO OPTIMIZE THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF THE SOIL

Summary

The paper considers methods for calculating the resistance to current spreading of a grounding device and compares the results of such calculations with experimental data. It is shown that the recommendations and algorithms for calculating the resistance of grounding devices (GD) presented in the well-known reference literature and regulatory documents do not correctly describe grounding devices mounted in heterogeneous soil, in particular, it is shown that such a factor as the proportional ratio of soils with different resistivity is practically not affects the final result. This fact misleads specialists, since when applying one or another technique used to calculate the grounding device, results are obtained that are significantly different from what is observed in practice. In the presented work, calculations of the resistance of the grounding device are given and, on their basis, a method for calculating the grounding device when using a soil-substituting mixture is proposed. Calculations of the GD resistance by different methods and comparison of the results, including those with experimental ones, are given. A fairly good convergence of the results with experimental data is shown, and a further direction in optimizing the methods of calculating grounding devices is determined.