

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХУРОВНЕВОГО ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНОГО ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ ИЗ ОДИНОЧНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Гуль В.И., к.т.н., проф., Нижегородский В.И., к.т.н., доц., Нижегородский И.В.
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Передача электрической энергии",
тел. (0572) 707-69-77

Приведені результати досліджень по подальшому розвитку методів розрахунку електричних характеристик заземлюючих пристроїв. Показано, що ці характеристики одержані для однорідної і неоднорідної структури ґрунту. Запропоновано узагальнене математичне визначення опору розтіканню і потенціалу в будь-якій точці напівпростору ґрунту. Одержані формули для розрахунку електричних характеристик двохрівневого еквіпотенціального заземлювача.

Приведены результаты исследований по дальнейшему развитию методов расчета электрических характеристик заземляющих устройств. Показано, что эти характеристики получены для однородной и неоднородной структуры грунта. Предложено обобщенное математическое определение сопротивления растеканию и потенциала в любой точке полупространства грунта. Получены формулы для расчета электрических характеристик двухуровневого эквипотенциального заземлителя.

Использование земли как элемента электрической цепи электротехнических объектов имеет широкое распространение. В зависимости от конкретных обстоятельств создание электрической связи с землей, т.е. заземление, имеет различающиеся цели. Так, рабочее заземление обеспечивает необходимый по условию нормального режима электроустановки уровень потенциала в точках заземления цепей, а также организует использование земли как пути для тока такого режима. Заземление молниезащиты создает контролируемый путь стекания тока молнии в землю. Физическое заземление применяется для уравнивания на близком к нулю уровне потенциалов корпусов, экранов и цепей физических приборов и установок в научных лабораториях, для ЭВМ.

Заземление некоторой физической точки, принадлежащей объекту или цепи, фактически обозначает образование проводимости или переходного сопротивления между точкой и грунтом с помощью электрода, введенного в электрический контакт с грунтом.

Деятельность человека в подавляющем большинстве случаев связана с многометровым слоем земли вглубь от так называемой дневной поверхности. Для инженерных задач удобно в пределах такого слоя классифицировать грунты как частные физико-химические формы общего понятия земли.

Размеры электрода из металла (в редких случаях из углеродосодержащих композиций) и электрические свойства грунтов определяют основные электрические характеристики заземления: сопротивление R_3 (растеканию) заземления как отношение потенциала U_3 точки ввода тока I в заземлитель к этому току и распределение потенциалов U_x на поверхности земли вблизи заземляемого объекта. Распределение U_x зависит от конструкции электродов заземлителя, от грунтов и потенциалов U_3 и определяет условия электробезопасности. В режиме, известном как поражение человека напряжением прикосновения $U_{пр}$, допустимые ограничения последствия такого поражения достигаются нормиро-

ванием наибольших величин $U_{пр}$: международные рекомендации по величинам $U_{пр}$ даны в Публикации 479 МЭК "Воздействие тока, проходящего через тело человека".

Широкий круг вопросов, связанных с заземлением, соотносится с двумя проблемами: первая - конструирование заземлителя (в общем случае заземляющего устройства ЗУ) под заданные параметры U_3 (или R_3 при расчетном токе I_3) и $U_{пр}$ и вторая - экспериментальный контроль достижения заданных параметров на данном ЗУ.

Возможности расчета ЗУ связаны с первой проблемой.

Рассматриваем две основные характеристики заземлителя: сопротивление растеканию R в месте ввода тока и потенциал на поверхности грунта в окрестностях заземлителя $\phi(M)$. В общем виде точка M может находиться в объеме полупространства грунта.

Для горизонтального электрода в однородном грунте (рис. 1) известно по ряду работ описание R_r (1) и $\phi(M)$ (2), в частности на поверхности грунта ($Z = 0$).

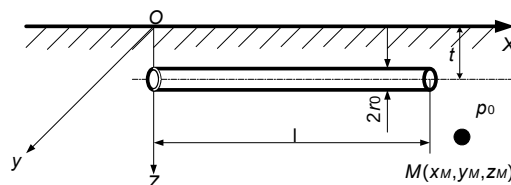


Рис. 1. Горизонтальный цилиндрический электрод, расположенный ниже поверхности земли

$$R_r = \frac{\rho_0}{4\pi l} \times \ln \frac{\left[0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + r_0^2}\right] \cdot \left[0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + r_0^2 + (2t)^2}\right]}{\left[-0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + r_0^2}\right] \cdot \left[-0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + r_0^2 + (2t)^2}\right]}; \quad (1)$$

$$\phi(M) = \frac{I_3}{4 \cdot \pi \cdot \gamma_0 \cdot l} \times \ln \frac{\left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + a^2}\right) \cdot \left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + b^2}\right)}{\left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + a^2}\right) \cdot \left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + b^2}\right)}, \quad (2)$$

где

$$a^2 = y_M^2 + (z_M - t)^2$$

$$b^2 = y_M^2 + (z_M + t)^2$$

Обычно $(r_0/0,5 \cdot l) < 10^{-2}$, а $(2 \cdot t/0,5 \cdot l) < 0,4$. При этом

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_0}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \frac{l^2}{2 \cdot r_0 \cdot t} + 0,5 \ln \left(1 + \frac{4 \cdot t^2}{l^2} \right) \right]. \quad (3)$$

При двух электродах, расположенных на разных глубинах укладки t (рис. 2), сопротивление системы учитывает взаимозащитное равнопотенциальное электродов 1 и 2.

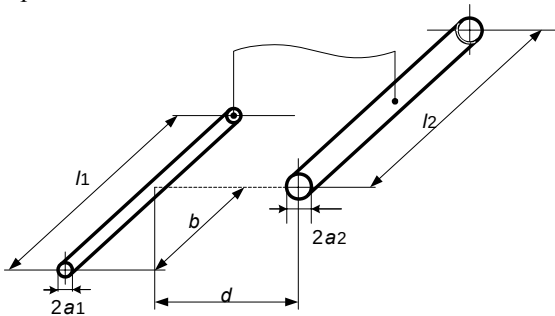


Рис. 2. Общий случай уединенного проводника, образованного соединением двух параллельных прямых проводов

Как отмечает Якобс А.И. [1], начиная с середины 30-х годов (Вайнер А.Л. – 1931 г., 1938 г.; Оллендорф Ф. – 1932 г. и др.), в качестве основного инженерного метода расчета сопротивления сложных заземлителей по заданным их геометрии и параметрам электрической структуры земли широко применяли коэффициенты использования. Идея этого метода заключается в расчете собственных сопротивлений α_{pp} элементов сложных заземлителей и в учете их взаимного влияния на результирующее сопротивление R_3 или на проводимость G_3 в общем случае одним безразмерным параметром η , названным коэффициентом использования. Численно коэффициент использования равен отношению проводимости G_3 к сумме проводимостей g_p всех его элементов при отсутствии взаимного влияния между ними (это возможно лишь в гипотетическом случае, когда все элементы сложного заземлителя находятся друг от друга на достаточно большом, теоретически бесконечном, расстоянии и электрически связаны между собой идеальными изолированными проводниками)

$$\eta = \frac{G_3}{\sum_{p=1}^n g_p},$$

где n - число элементов сложного заземлителя.

Коэффициенты использования, являясь сложными функциями геометрических параметров заземлителей и параметров электрической структуры земли, отражают взаимное потенциальное влияние элементов сложного заземлителя интегрально (обобщенно).

Сопротивление заземлителя в виде системы электродов 1 и 2 является, естественно, обратной величиной суммарной проводимости растеканию:

$$G_{1-2} = G_1 + G_2 - 2 \cdot G_{12}. \quad (4)$$

Результат взаимозащитного в нашем случае равнопотенциальных электродов, т.е. величину G_{1-2} , оценим, применив метод электростатической аналогии к расчету сложных заземлителей (Воробьев В.И., 1934 г.). Метод широко используется и в настоящее время. Так,

$$R = G^{-1} = \varepsilon / (\gamma \cdot C), \quad (5)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды, в которой рассчитывается емкость электродной системы, а γ - удельная объемная проводимость среды с теми же электродами. Взаимный потенциальный коэффициент для системы электродов по рис. 2 рекомендуется [2] рассчитывать при $b = 0$ как

$$\alpha_{12} \cong \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l_2} \cdot \left[\text{Arsh} \frac{l_1}{d} + \frac{l_2}{l_1} \cdot \text{Arsh} \frac{l_2}{d} - \left(\frac{l_2}{l_1} - 1 \right) \cdot \text{Arsh} \frac{l_2 - l_1}{d} + \frac{d}{l_1} + \sqrt{\left(\frac{d}{l_1} \right)^2 + \left(\frac{l_2}{l_1} - 1 \right)^2} - \sqrt{\left(\frac{d}{l_1} \right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{d}{l_1} \right)^2 + \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^2} \right], \quad (6)$$

где l и d в метрах; $\varepsilon = (36 \cdot \pi)^{-1} \cdot 10^{-9}$, Ф/м.

Однородность грунта позволяет принять γ [Ом·м]⁻¹ известной при подстановке в (5) взаимной емкости $C_{вз} = (\alpha_{12})^{-1}$.

Потенциал $\phi(M)$ в точке M для рассматриваемой системы электродов находим путем суммирования потенциалов от электродов 1 и 2, используя (2).

При потенциале точки ввода $\phi(0)$ в систему вводится ток I_0 , который распределится пропорционально эффективным проводимостям электродов $G_{1\text{эф}} = G_1 - G_{12}$ и $G_{2\text{эф}} = G_2 - G_{12}$. Знание токов I_1 и I_2 достаточно для расчета $\phi(M)$ по выражению (2).

Объем вычислений для определения характеристик заземлителя в двухслойном грунте значительно возрастает. Действительно, следуя работам Бургсдорфа В.В. и Якобса А.И. для расположения горизонтального электрода в верхнем слое (рис. 3) рекомендовано использовать выражения (7) и (8).

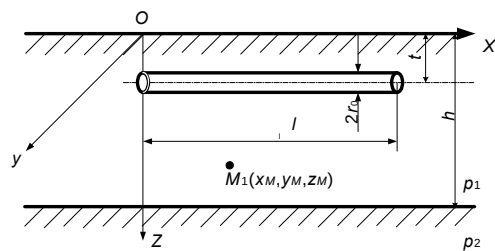


Рис. 3. Горизонтальный электрод, расположенный в верхнем слое двухслойной электрической структуры земли

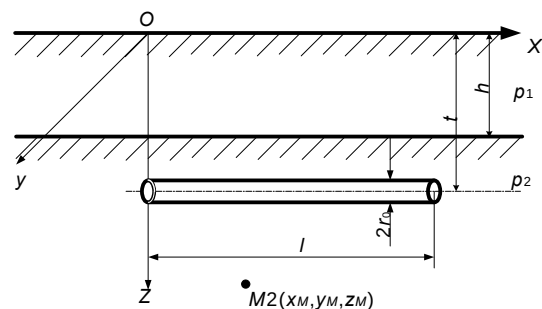


Рис. 4. Горизонтальный электрод, расположенный в нижнем слое двухслойной электрической структуры земли

$$\begin{aligned}
\Phi_{M1}(x_M, y_M, z_M) = & \\
= & \frac{I_3 \cdot \rho_1}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{\left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (z_M - t)^2} \right) \times}{\left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (z_M - t)^2} \right) \times} \rightarrow \right. \\
& \times \frac{\left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (z_M + t)^2} \right)}{\left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (z_M + t)^2} \right)} + \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n \cdot \left[\ln \frac{\left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2n \cdot h + z_M - t)^2} \right) \times}{\left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2n \cdot h + z_M - t)^2} \right) \times} \rightarrow \right. \\
& \times \frac{\left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2n \cdot h + z_M + t)^2} \right)}{\left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2n \cdot h + z_M + t)^2} \right)} + \\
& + \ln \frac{\left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2n \cdot h - z_M + t)^2} \right) \times}{\left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2n \cdot h - z_M + t)^2} \right) \times} \rightarrow \\
& \left. \times \frac{\left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2n \cdot h - z_M - t)^2} \right)}{\left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2n \cdot h - z_M - t)^2} \right)} \right] \Bigg\}. \quad (7)
\end{aligned}$$

Сопротивление такого электрода находим с учетом малого значения r_0 по сравнению с $0,5 \cdot l$

$$\begin{aligned}
R_{\Gamma} = & \frac{\Phi_{M1}(0,5 \cdot l, r_0, t)}{I_3} = \\
= & \frac{\rho_1}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left\{ 2 \ln \frac{l}{r_0} + \ln \frac{0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t)^2}}{-0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t)^2}} + \right. \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n \cdot \left[\ln \frac{\left(0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h + 2 \cdot t)^2} \right) \times}{\left(-0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h + 2 \cdot t)^2} \right) \times} \rightarrow \right. \\
& \times \frac{\left(0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h - 2 \cdot t)^2} \right)}{\left(-0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h - 2 \cdot t)^2} \right)} + \\
& \left. + 2 \ln \frac{0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h)^2}}{-0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2n \cdot h)^2}} \right] \Bigg\}. \quad (8)
\end{aligned}$$

Коэффициент $k_{21} = (\rho_2 - \rho_1)(\rho_1 + \rho_2)$, число учитываемых членов суммы принято оценивать по критерию достаточности

$$\Delta = \left| \frac{I^{(n-1)} - I^{(n)}}{I^{(n)}} \right| \leq \Delta_{\text{доп}},$$

где $I^{(n)}$ - сумма при n слагаемых; $\Delta_{\text{доп}} \approx$ до 5%.

Расположение заземлителя в нижней области ρ_2 (рис. 4) приводит к расчетному выражению (9).

$$\begin{aligned}
R_{\Gamma} = & \frac{\rho_2}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left[2 \ln \frac{l}{r_0} - k_{2,1} \cdot \ln \frac{0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t - 2 \cdot h)^2}}{-0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t - 2 \cdot h)^2}} + \right. \\
& + (1 - k_{2,1}^2) \cdot \ln \frac{0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t)^2}}{-0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t)^2}} + \\
& \left. + (1 - k_{2,1}^2) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n \cdot \ln \frac{0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t + 2n \cdot h)^2}}{-0,5 \cdot l + \sqrt{(0,5 \cdot l)^2 + (2 \cdot t + 2n \cdot h)^2}} \right]. \quad (9)
\end{aligned}$$

Предположим, что электрод 1 находится в верхнем слое (ρ_1, t_1, h), а электрод 2 – в нижнем слое ($\rho_2,$

$t_2 > h$), как это показано на рис. 5. И в этой ситуации выражение (2) корректно, однако оценка G_{1-2} требует нового подхода. Предложено принять между электродами однородный грунт

$$\rho_{\text{однор}} = \frac{\rho_1 \cdot \Delta h_1 + \rho_2 \cdot \Delta h_2}{\Delta h_1 + \Delta h_2}, \quad (10)$$

где $\Delta h_1 = h - t_1$; $\Delta h_2 = t_2 - h$.

Такое предложение делает возможным использование (6) при определенном $\gamma_{\text{однор}}$.

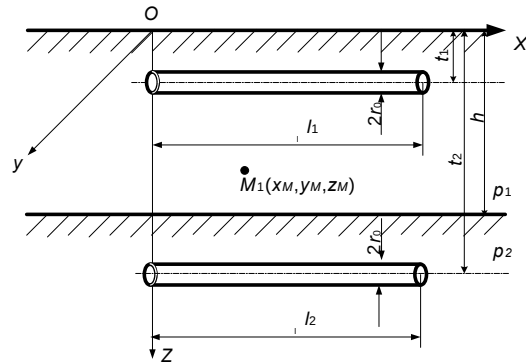


Рис. 5. Два горизонтальных электрода, расположенные один в нижнем, а второй в верхнем слое двухслойной электрической структуры земли

Следует отметить, что определение $\phi(M)$ в верхнем слое для электрода в нижнем слое требует дополнительной разработки. В ряде случаев можно допустить как вариант размещение обоих электродов в верхнем слое, что предполагает использование (7) и (8) в условиях постоянства ρ_1 и ρ_2 как параметров структуры грунта.

Расширение исследования поставленной задачи приводит к учету смещения электродов, т.е. $b \neq 0$ (рис. 2).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. - М.: Энергоатомиздат, 1987.- 400 с.
- [2] Иоссель Ю.Я., Качанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. - М.: Энергия, 1969.- 288 с.
- [3] Гуль В.И. Возможности упрощения заземляющих устройств //Вестник ХГПУ. Вып.112. - Харьков: ХГПУ, 2000.- С. 9-21.

Поступила 25.01.2006