

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТЯЖЕННЫХ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ В НЕОДНОРОДНОЙ ЗЕМЛЕ

В данной работе предлагается алгоритм расчета входного сопротивления и постоянной распространения одного или системы параллельно продолженных проводников, находящихся в земле.

Предположим, что один проводник или система проводников длиной l расположены в первом слое многослойной земли с удельными сопротивлениями слоев $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_i, \dots, \rho_n$, мощностями слоев $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_{n-1}$ ($h_n = \infty$) и магнитной проницаемостью слоев $\mu_i = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, причем глубина заложения проводников t , а расстояние от осей до поверхности второго слоя h_0 (рис. 1). Расположение проводников в первом слое земли принято с учетом того, что в реальных условиях выходящие из электроустановок коммуникации, как правило, прокладываются в первом слое земли. Ток I с круговой частотой ω вводится в начало проводника.

Волновое сопротивление Z_B и постоянная распространения γ таких проводников определяется по выражениям [4]:

$$\gamma = \sqrt{\frac{Z_{\Pi} + Z_{ВН1} + (m-1)Z_{ВНм}}{R_{пер1} + (m-1)R_{перм}}}; \quad Z_B = \sqrt{\frac{Z_{\Pi} + Z_{ВН1} + (m-1)Z_{ВНм}}{(R_{пер} + (m-1)R_{перм})^{-1}}}, \quad (1)$$

где Z_{Π} — поверхностное сопротивление одного проводника, включающее внутреннее продольное сопротивление и сопротивление, обусловленное его поверхностной индуктивностью; $Z_{ВН1}$ — внешнее сопротивление одного проводника, обусловленное его внешней индуктивностью с учетом конечной проводимости земли; $Z_{ВНм}$ — внешнее эквивалентное сопротивление системы проводников; $R_{пер1}$ — переходное сопротивление одного проводника; $R_{перм}$ —

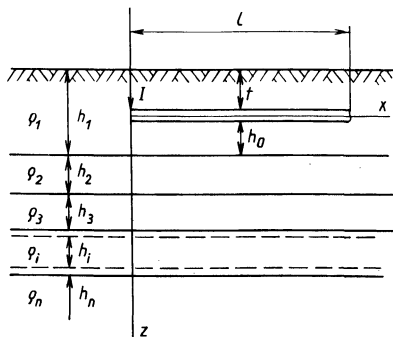


Рис. 1. Расчетная модель протяженного заземлителя в многослойной земле.

переходное эквивалентное сопротивление системы проводников; m — число проводников.

Определение сопротивления Z_{Π} не вызывает особых затруднений. Главная трудность при расчете $Z_{\text{вн}}$ и γ возникает при определении $Z_{\text{вн}1}$, $Z_{\text{вн}m}$ и $R_{\text{пер}1}$, $R_{\text{пер}m}$.

Упростить задачу определения этих параметров можно на основе введения понятия линейного точечного источника тока [1]. В качестве такого источника тока используем электрический диполь, ориентированный по длине проводника. Учитывая то, что с допустимой погрешностью $Z_{\text{вн}}$ и γ могут определяться в предположении бесконечно длинного проводника [1], для $Z_{\text{вн}}$ и $R_{\text{пер}}$ будет иметь

$$Z_{\text{вн}} = \frac{1}{I_{10}} \int_0^{\infty} E_1 dl; \quad R_{\text{пер}} = \frac{1}{I_{\Pi 0}} \int_0^{\infty} U dl, \quad (2)$$

где E_1 , U — продольная напряженность и потенциал диполя в заданной точке; I_{10} , $I_{\Pi 0}$ — продольная и поперечная составляющие тока в заданной точке проводника.

Предполагая, как это делается в подобных случаях, что ток по длине бесконечно длинного проводника изменяется по закону $I_1 = I_{10} 1^{-\gamma x}$, на основании (2) с использованием выражения для E_1 и U из [2], для $Z_{\text{вн}}$ и $R_{\text{пер}}$ получим:

$$Z_{\text{вн}} = \gamma \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \int_0^{\infty} \left\{ \frac{mR_1^+ R^-}{\eta_1 (R_1^+ + R^-)} \right\} \left[\frac{2\gamma \cos\left(\frac{my}{\sqrt{2}}\right)}{m^2 + 2\gamma^2} + \frac{(\sqrt{m^2 + \gamma^2} - \gamma)^2 \cos(y\sqrt{m^2 + \gamma^2})}{\sqrt{m^2 + \gamma^2} (m^2 + 2\gamma^2)} \right] dm; \quad (3)$$

$$R_{\text{пер}} = \frac{2\rho_1}{\pi} \int_0^{\infty} \left\{ \frac{m(a+1)}{\eta_1 A} + \frac{2(m+\eta_1)a}{\eta B} \left[\frac{(a+1)(R_1^+ + 1)}{A} - R_1^+ \right] + C \right\} x$$

$$x \left[\frac{2\gamma \cos\left(\frac{my}{\sqrt{2}}\right)}{m^2 + 2\gamma^2} + \frac{(\sqrt{m^2 + \gamma^2} - \gamma)^2 \cos(y\sqrt{m^2 + \gamma^2})}{\sqrt{m^2 + \gamma^2} (m^2 + 2\gamma^2)} \right] dm; \quad (4)$$

где

$$R_i^+ = \frac{\frac{\eta_1}{\eta_{i+1}} R_{i+1}^+ + 1 + \left(\frac{\eta_i}{\eta_{i+1}} R_{i+1}^+ - 1 \right) e^{-2\eta_i h_i}}{\frac{\eta_i}{\eta_{i+1}} R_{i+1}^+ + 1 - \left(\frac{\eta_i}{\eta_{i+1}} R_{i+1}^+ - 1 \right) e^{-2\eta_i h_i}}; \quad R_i^- = \frac{a - \frac{m - \eta_1}{m + \eta_1}}{a + \frac{m - \eta_1}{m + \eta_1}};$$

$$\bar{R}_i^+ = \frac{\frac{\rho_i \eta_i}{\rho_{i+1} \eta_{i+1}} \bar{R}_{i+1}^+ + 1 + \left(\frac{\rho_i \eta_i}{\rho_{i+1} \eta_{i+1}} \bar{R}_{i+1}^+ - 1 \right) e^{-2\eta_i h_i}}{\frac{\rho_i \eta_i}{\rho_{i+1} \eta_{i+1}} \bar{R}_{i+1}^+ + 1 - \left(\frac{\rho_i \eta_i}{\rho_{i+1} \eta_{i+1}} \bar{R}_{i+1}^+ - 1 \right) e^{-2\eta_i h_i}}; \quad \bar{R}^- = \frac{a-1}{a+1};$$

$$\eta_i = \sqrt{m^2 + k_i^2}; k_i^2 = j \frac{\omega \mu_0}{\rho_i}; h_1 = h_0; \bar{R}_n^+ = R_n^+ = 1; a = e^{2\eta_1 h_0};$$

$$A = [(\bar{R}_1^+ + 1)a + \bar{R}_1^+ - 1];$$

$$B = \frac{2am(m + \eta_1)(R_1^+ + 1)}{k^2} + [R_1^+(a-1) + a + 1];$$

$$C = \frac{k^2(a+1)}{m\eta_1 A B} \{ [R_1^+(a-1) + a + 1] - AR_1^+ \}$$

при $m = 0$ $C = 0$.

При определении $Z_{\text{вн}1}$ и $R_{\text{пер}1}$ у принимается равным радиусу проводника, а при определении $Z_{\text{вн}m}$ и $R_{\text{пер}m}$ — среднему расстоянию между параллельно проложенными проводниками [4].

Постоянная распространения γ с учетом (1), (3) и (4) определяется методом итераций. В качестве нулевого приближения целесообразно принимать $\gamma = (1 + j)k_1/\sqrt{2}$.

Практическая реализация полученных расчетных соотношений связана с вычислением численными методами интегралов вида

$$I = \int_0^{\infty} \frac{W(m)}{m^2 + 2\gamma^2} \left[2\gamma \cos\left(\frac{my}{\sqrt{2}}\right) + \frac{(\sqrt{m^2 + \gamma^2} - \gamma)^2}{\sqrt{m^2 + \gamma^2}} \cos(y\sqrt{m^2 + \gamma^2}) \right] dm, \quad (5)$$

где $W(m)$ — множитель подынтегральной функции в (3), (4), заключенный в фигурные скобки.

Анализ показывает, что интеграл (5) может быть представлен в виде

$$I = \int_0^{m_n} W(m) \left[\frac{2\gamma \cos\left(\frac{my}{\sqrt{2}}\right)}{m^2 + 2\gamma^2} + \frac{(\sqrt{m^2 + \gamma^2} - \gamma)^2 \cos(y\sqrt{m^2 + \gamma^2})}{(m^2 + 2\gamma^2)\sqrt{m^2 + \gamma^2}} \right] dm + F(m_n, y); \quad (6)$$

$$\text{где для } Z_{\text{вн}} - F(m_n, y) = \frac{1}{2} \int_{m_n}^{\infty} \frac{\cos(my)}{m} dm = -\frac{1}{2} \text{Ci}(m_n y),$$

$$\begin{aligned} \text{а для } R_{\text{пер}} - F(m_n, y) &= \frac{1}{2} \int_{m_n}^{\infty} \frac{(1 + e^{-2h_0 m}) \cos(my)}{m} dm = \\ &= \frac{E_1[m_n(2h_0 - jy)] + E_1[m_n(2h_0 + jy)] - \text{Ci}(m_n y)}{2}. \end{aligned}$$

Здесь m_n выбирается наибольшее из значений $m_n = 5 \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho_n}}$,

$m_n = 2,5/h_1$ (ρ_n , h_1 — наименьшее из удельных сопротивлений и мощность первого слоя геоэлектрического разреза земли); $E_1(z)$, $\text{Ci}(z)$ — соответственно интегральная показательная функция и ин-

интегральный косинус (определяются по приближенным формулам [3]).

Первый интеграл в (6) вычисляется численным методом на основе частичной аппроксимации $W(m)$ многочленом p -й степени на заданном интервале $[0, m_n]$ с последующим интегрированием полученного выражения для подынтегральной функции. В этом случае будем иметь

$$\int_0^{m_n} W(m) \left[\frac{2\gamma \cos\left(\frac{my}{\sqrt{2}}\right)}{m^2 + 2\gamma^2} + \frac{(\sqrt{m^2 + \gamma^2} - \gamma)^2 \cos(y\sqrt{m^2 + \gamma^2})}{\sqrt{m^2 + \gamma^2} (m^2 + 2\gamma^2)} \right] dm =$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{k=0}^p a_{ik} \int_{m_i}^{m_{i+1}} m^k \left[\frac{2\gamma \cos\left(\frac{my}{\sqrt{2}}\right)}{m^2 + 2\gamma^2} + \frac{(\sqrt{m^2 + \gamma^2} - \gamma)^2 \cos(y\sqrt{m^2 + \gamma^2})}{\sqrt{m^2 + \gamma^2} (m^2 + 2\gamma^2)} \right] dm, \quad (7)$$

где n — число промежутков интегрирования на интервале $[0, m_n]$; i, k — текущие индексы соответственно промежутков интегрирования и степени членов многочлена; m_i, m_{i+1} — координаты начала и конца промежутков интегрирования; a_{ik} — коэффициенты многочлена.

Коэффициенты a_{ik} определяются известными методами по значениям функции $W(m)$. Интегралы в (7) берутся в явном виде, причем функции $\sqrt{m^2 + \gamma^2}$ и $1/(m^2 + 2\gamma^2)$ аппроксимируются на каждом подинтервале многочленом первой степени.

Предложенный алгоритм реализован в программе, написанной на языке ФОРТРАН-IV ДЭС ЕС, и позволяет рассчитать входное сопротивление проводника или системы проводников, проложенных в первом слое многослойной земли с учетом зависимости электрических параметров проводника от постоянной распространения и напряженности магнитного поля. Время счета на ЭВМ-1020 не превышает 10 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. — М.: Стройиздат, 1967. — 247 с.
2. Давыдов В.М. Электромагнитное поле наклонного электрического диполя. — Тр. АН СССР Сиб. отделение "Электромагнитные поля в геофизических методах исследования", М.: Наука, 1970. — 52 с.
3. Справочник по специальным функциям. — М.: Наука, 1979. — 832 с.
4. Михайлов М.И. Защита кабельных линий связи от влияния внешних электромагнитных полей. — М.: Связь, 1967. — 248 с.