

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА, СОЗДАВАЕМОГО ЗАЗЕМЛЯЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ В ТРЕХСЛОЙНОМ ГРУНТЕ

Д.Г. Колиушко*, канд.техн.наук, С.С. Руденко**

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, Украина, e-mail: nio5_molniva@ukr.net

Определены аналитические выражения для потенциала электрического поля, созданного системой заземлителей произвольной конфигурации с учетом трехслойной геоэлектрической структуры, на основе решения задачи о потенциале точечного источника тока, с учетом линейного распределения тока по длине электрода, а также метода аналогии между электростатическим полем и полем, созданным квазипостоянным источником тока. Суммарный потенциал системы заземлителей определяется с помощью принципа суперпозиции полей. В работе получены аналитические выражения для нахождения в произвольной точке наблюдения потенциала, созданного полем единственного электрода. Полученные выражения позволяют без применения метода эквивалентирования производить расчет заземляющих устройств и определять их нормируемые параметры для подавляющего большинства энергообъектов Украины классом напряжения 35–750 кВ. Применение аналитического решения позволяет значительно повысить точность расчета электрического потенциала по сравнению с моделями, построенными на основании методов оптической аналогии или конечных разностей. Библ. 11, табл. 1, рис. 1.

Ключевые слова: заземляющее устройство, электрический потенциал, трехслойный грунт, нормируемые параметры, точечный источник тока, аналитическое решение.

Введение. Определение значений нормируемых параметров (НП) заземляющих устройств (ЗУ) действующих электрических станций и подстанций, а именно напряжения прикосновения, напряжения на ЗУ и сопротивления ЗУ экспериментальным путем зачастую вызывает существенные трудности. Поэтому как отечественным [1], так и зарубежным [2] нормативными документами допускается применение экспериментально-расчетных методов [3, 4, 5]. В большинстве случаев используется математическое моделирование электромагнитных процессов в ЗУ, основанное на решении полевой задачи о потенциале электрического поля, созданного системой заземлителей. При этом, как правило, грунт представляется двухслойной геоэлектрической структурой [4, 5]. С помощью модели [4] были проведены расчеты для ряда энергетических объектов Украины классом напряжения 35–750 кВ, а модель, рассмотренная в [5], является одной из самых популярных в мире коммерческих версий. Исходными данными для выполнения расчетов являются экспериментально определенные электрофизические характеристики грунта, реальная конструкция ЗУ, а также характеристики объекта (ток однофазного замыкания на землю, режим работы нейтрали трансформатора и т.д.). Существенным недостатком указанных моделей является то, что с их помощью можно непосредственно (без использования метода эквивалентирования грунта) проводить расчеты лишь для 8,3 % энергетических объектов Украины [6], в то время как большая часть ЗУ энергообъектов Украины расположены на территории с трехслойным грунтом.

Существующие модели для определения НП ЗУ, размещенного в многослойном грунте, базируются на следующих методах: конечных разностей, который может быть применен лишь для расчета элементарных заземлителей в связи с необходимостью выполнения большого объема вычислений; оптической аналогии (МОА) или модифицированном МОА с использованием метода Прони [3]. Именно последние два нашли наиболее широкое применение при расчете НП ЗУ, расположенного в грунте с числом слоев три и более. Однако они требуют значительно большего времени расчета в сравнении с математической моделью, основанной на аналитическом решении задачи о потенциале поля точечного источника тока (ТИТ):

– МОА для трехслойного грунта – медленнее, чем для двухслойного, т.к. расчетное количество узлов схемы увеличится в $(2n+1)$ раз, где n – количество слоев грунта;

– модифицированного МОА с использованием метода Прони для трехслойного грунта в три раза медленнее, чем для двухслойного, т.к. расчетное количество узлов схемы увеличивается в три раза.

Моделирование электромагнитных процессов в ЗУ проводится в различных режимах однофазного короткого замыкания (КЗ), и их число зависит от количества оборудования, расположенного на подстанции. Например, расчет 250 режимов КЗ для одной из подстанций Днепровской энергосистемы с количеством узлов схемы ЗУ $N_g = 7200$ с помощью компьютера средней мощности (Intel Core Duo 3,4 ГГц, ОЗУ – 3 Гб) потребует 125 часов, соответственно для МОА – 875 часов, а для МОА с методом Прони – 375 часов.

Таким образом, определение потенциала электрического поля, созданного системой заземлителей произвольной конфигурации, расположенной в грунте с трехслойной геоэлектрической структурой, является актуальной задачей.

© Колиушко Д.Г., Руденко С.С., 2018

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-3112-4260>; ** <https://orcid.org/0000-0002-2544-1545>

В связи с этим **целью работы** является определение аналитических выражений для потенциала электрического поля, созданного системой заземлителей произвольной конфигурации с учетом трехслойной геоэлектрической структуры.

Аналитическое решение задачи. Главным условием возможности применения ТИТ для использования математической модели, описанной в [11], является тот факт, что длина заземлителя значительно меньше длины электромагнитной волны в проводящей среде (не менее чем в 10 раз). Это позволяет проводить вычисления электрических параметров элементов ЗУ в статическом приближении [8, 9]. Известно, что для ЗУ, которое рассматривается как совокупность электродов длиной до 20 м, указанное условие будет всегда выполняться для тока частотой 50 Гц при всех возможных значениях удельного сопротивления грунта. Кроме того, в [10] показано, что для грунта с удельным сопротивлением $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при частоте 50 Гц и среднем значении относительной диэлектрической проницаемости почвы равной $\epsilon=10$ плотность тока проводимости будет в 36 раз больше плотности тока смещения, а для удельного сопротивления $3\cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – в 1000 раз. Таким образом, при использовании математической модели для декартовой системы координат можно учитывать только токи проводимости и использовать решение задачи о электрическом потенциале ТИТ.

Представим уединенный электрод ЗУ в виде множества ТИТ, расположенных вдоль его оси (рисунок). Структуру грунта представим в виде проводящего полупространства с плоскопараллельными границами раздела слоев. Каждый i -й слой имеет удельное сопротивление ρ_i и глубину расположения границ раздела соседних слоев h_i . При этом плотность тока такого источника, находящегося на оси i -го электрода, представим в виде [7]

$$j_i(l_i) = j_i^{\text{beg}} + (j_i^{\text{end}} - j_i^{\text{beg}}) \frac{l_i}{L_i}, \quad (1)$$

где $j_i^{\text{beg}}, j_i^{\text{end}}$ – плотности тока в начальном и конечном узлах i -го электрода; l_i – расстояние вдоль i -го электрода, определенное от его начального узла; L_i – длина i -го электрода.

Математическая модель и выражения в явном виде для потенциала поля ТИТ, расположенного в трехслойном проводящем полупространстве, для цилиндрической системы координат определены в [11].

В свою очередь, координаты ТИТ в декартовой системе координат можно представить в виде

$$x_s = x_i^{\text{beg}} + (x_i^{\text{end}} - x_i^{\text{beg}}) \frac{l_i}{L_i}; \quad y_s = y_i^{\text{beg}} + (y_i^{\text{end}} - y_i^{\text{beg}}) \frac{l_i}{L_i}; \quad z_s = z_i^{\text{beg}} + (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}}) \frac{l_i}{L_i}, \quad (2)$$

где $x_i^{\text{beg}}, y_i^{\text{beg}}, z_i^{\text{beg}}$ и $x_i^{\text{end}}, y_i^{\text{end}}, z_i^{\text{end}}$ – координаты начального и конечного узлов i -го электрода соответственно.

С учетом [11], а также (1) и (2) были получены выражения для определения потенциала электрического поля, создаваемого заземлителем произвольной направленности и расположенным в трехслойном грунте:

а) точка P и электрод расположены в первом слое

$$\begin{aligned} \varphi_{i,1} = & \frac{\rho_1}{4\pi} \left[j_i^{\text{beg}} \left[\left(G_{1,i} + G_{2,i} + K_{2,1} \sum_{n=0}^m K_n (G_{3,i} + G_{4,i} + G_{5,i} + G_{6,i}) + K_{3,2} \sum_{n=0}^m K_n (G_{7,i} + G_{8,i} + G_{9,i} + G_{10,i}) \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \left(S_{1,i} + S_{2,i} + K_{2,1} \sum_{n=0}^m K_n (S_{3,i} + S_{4,i} + S_{5,i} + S_{6,i}) + K_{3,2} \sum_{n=0}^m K_n (S_{7,i} + S_{8,i} + S_{9,i} + S_{10,i}) \right) \right] + \right. \\ & \left. + j_i^{\text{end}} \left[S_{1,i} + S_{2,i} + K_{2,1} \sum_{n=0}^m K_n (S_{3,i} + S_{4,i} + S_{5,i} + S_{6,i}) + K_{3,2} \sum_{n=0}^m K_n (S_{7,i} + S_{8,i} + S_{9,i} + S_{10,i}) \right] \right]; \end{aligned}$$

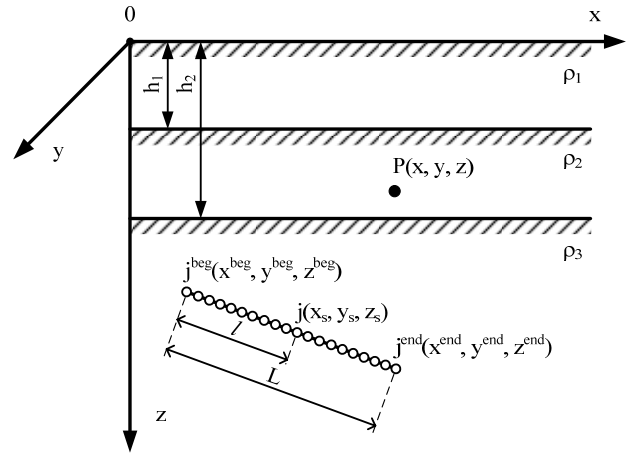
б) точка P находится во втором слое, а электрод – в первом

$$\begin{aligned} \varphi_{i,2} = & \frac{\rho_1}{4\pi} (1 + K_{2,1}) \times \left[j_i^{\text{beg}} \left(\sum_{n=0}^m K_n (G_{11,i} + G_{12,i} + K_{3,2} (G_{8,i} + G_{10,i})) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \sum_{n=0}^m K_n (S_{11,i} + S_{12,i} + K_{3,2} (S_{8,i} + S_{10,i})) \right) + j_i^{\text{end}} \sum_{n=0}^m K_n (S_{11,i} + S_{12,i} + K_{3,2} (S_{8,i} + S_{10,i})) \right]; \end{aligned}$$

в) точка P находится в третьем слое, а электрод – в первом

$$\varphi_{i,3} = \frac{\rho_1}{4\pi} (1 + K_{2,1})(1 + K_{3,2}) \left[j_i^{\text{beg}} \left(\sum_{n=0}^m K_n (G_{11,i} + G_{12,i}) - \sum_{n=0}^m K_n (S_{11,i} + S_{12,i}) \right) + j_i^{\text{end}} \sum_{n=0}^m K_n (S_{11,i} + S_{12,i}) \right];$$

г) точка P находится в первом слое, а электрод – во втором



$$\varphi_{i1,2} = \frac{\rho_2}{4\pi} (1 - K_{2,1}) \times \left[j_i^{\text{beg}} \left(\sum_{n=0}^m K_n (G_{12,i} + G_{13,i} + K_{3,2} (G_{9,i} + G_{10,i})) \right) - \sum_{n=0}^m K_n (S_{12,i} + S_{13,i} + K_{3,2} (S_{9,i} + S_{10,i})) \right] + j_i^{\text{end}} \sum_{n=0}^m K_n (S_{12,i} + S_{13,i} + K_{3,2} (S_{9,i} + S_{10,i}));$$

д) точка P и электрод расположены во втором слое

$$\varphi_{i2,2} = \frac{\rho_2}{4\pi} \left[j_i^{\text{beg}} \left(G_{1,i} + \sum_{n=0}^m K_n (G_{12,i} - K_{2,1} G_{16,i} + K_{3,2} (G_{8,i} + G_{9,i} + G_{10,i})) - K_{2,1} K_{3,2} (G_{14,i} + G_{15,i} + G_{17,i}) \right) - S_{1,i} - \sum_{n=0}^m K_n (S_{12,i} - K_{2,1} S_{16,i} + K_{3,2} (S_{8,i} + S_{9,i} + S_{10,i})) - K_{2,1} K_{3,2} (S_{14,i} + S_{15,i} + S_{17,i}) \right] + j_i^{\text{end}} \left(S_{1,i} + \sum_{n=0}^m K_n (S_{12,i} - K_{2,1} S_{16,i} + K_{3,2} (S_{8,i} + S_{9,i} + S_{10,i})) - K_{2,1} K_{3,2} (S_{14,i} + S_{15,i} + S_{17,i}) \right);$$

е) точка P находится в третьем слое, а электрод – во втором

$$\varphi_{i3,2} = \frac{\rho_2}{4\pi} (1 + K_{3,2}) \times \left[j_i^{\text{beg}} \left(\sum_{n=0}^m K_n (G_{11,i} + G_{12,i} - K_{2,1} (G_{5,i} + G_{16,i})) - \sum_{n=0}^m K_n (S_{11,i} + S_{12,i} - K_{2,1} (S_{5,i} + S_{16,i})) \right) \right] + j_i^{\text{end}} \sum_{n=0}^m K_n (S_{11,i} + S_{12,i} - K_{2,1} (S_{5,i} + S_{16,i}));$$

ж) точка P находится в первом слое, а электрод – в третьем

$$\varphi_{i1,3} = \frac{\rho_3}{4\pi} (1 - K_{2,1})(1 - K_{3,2}) \times \left[j_i^{\text{beg}} \left(\sum_{n=0}^m K_n (G_{12,i} + G_{13,i}) - \sum_{n=0}^m K_n (S_{12,i} + S_{13,i}) \right) \right] + j_i^{\text{end}} \sum_{n=0}^m K_n (S_{12,i} + S_{13,i});$$

и) точка P находится в первом слое, а электрод – в третьем

$$\varphi_{i2,3} = \frac{\rho_3}{4\pi} (1 - K_{3,2}) \times \left[j_i^{\text{beg}} \left(\sum_{n=0}^m K_n (G_{12,i} + G_{13,i} - K_{2,1} (G_{4,i} + G_{16,i})) - \sum_{n=0}^m K_n (S_{12,i} + S_{13,i} - K_{2,1} (S_{4,i} + S_{16,i})) \right) \right] + j_i^{\text{end}} \sum_{n=0}^m K_n (S_{12,i} + S_{13,i} - K_{2,1} (S_{4,i} + S_{16,i}));$$

к) точка P и электрод расположены в третьем слое

$$\varphi_{i3,3} = \frac{\rho_3}{4\pi} \left[j_i^{\text{beg}} \left(G_{1,i} - S_{1,i} + \sum_{n=0}^m K_n (G_{12,i} - K_{2,1} G_{16,i} - K_{3,2} (G_{19,i} - K_{2,1} G_{18,i})) - \sum_{n=0}^m K_n (S_{12,i} - K_{2,1} S_{16,i} - K_{3,2} (S_{19,i} - K_{2,1} S_{18,i})) \right) \right] + j_i^{\text{end}} \times \left[S_{1,i} + \sum_{n=0}^m K_n (S_{12,i} - K_{2,1} S_{16,i} - K_{3,2} (S_{19,i} - K_{2,1} S_{18,i})) \right];$$

где $G_{k,i}$ и $S_{k,i}$ – геометрические коэффициенты, полученные при интегрировании по длине электрода и переходе к декартовой системе координат, и соответственно равны (с учетом, что $L = \sqrt{A}$):

$$G_{k,i} = \int_0^{l_i} \frac{dl_i}{\sqrt{A_i (l_i^2/L_i^2) + B_{k,i} (l_i/L_i) + C_{k,i}}} = \ln \left| \sqrt{1 + \frac{B_{k,i} + C_{k,i}}{A_i} + \frac{B_{k,i}}{2A_i} + 1} - \ln \left| \frac{B_{k,i}}{2A_i} + \sqrt{\frac{C_{k,i}}{A_i}} \right| \right|;$$

$$S_{k,i} = \frac{1}{L_i} \int_0^{l_i} \frac{l_i dl_i}{\sqrt{A_i (l_i^2/L_i^2) + B_{k,i} (l_i/L_i) + C_{k,i}}} = \sqrt{1 + \frac{B_{k,i} + C_{k,i}}{A_i}} - \sqrt{\frac{C_{k,i}}{A_i}} - \frac{B_{k,i}}{2A_i} G_{k,i};$$

где

$$A = (x_i^{\text{end}} - x_i^{\text{beg}})^2 + (y_i^{\text{end}} - y_i^{\text{beg}})^2 + (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}})^2;$$

$$B_{1,2} = 2 \left[M + (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}}) (z_i^{\text{beg}} \mp z) \right]; \quad C_{1,2} = N + (z_i^{\text{beg}} \mp z)^2;$$

$$B_{3,4} = 2 \left[M \pm (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}}) (z \pm z_i^{\text{beg}} \pm 2h_1 \pm H_n) \right]; \quad C_{3,4} = N + (z \pm z_i^{\text{beg}} \pm 2h_1 \pm H_n)^2;$$

$$B_{5,6} = 2 \left[M \mp (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}}) (z \mp z_i^{\text{beg}} \pm 2h_1 \pm H_n) \right]; \quad C_{5,6} = N + (z \mp z_i^{\text{beg}} \pm 2h_1 \pm H_n)^2;$$

$$\begin{aligned}
B_{7,8} &= 2[M \pm (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}})(z \pm z_i^{\text{beg}} \pm 2h_2 \pm H_n)]; & C_{7,8} &= N + (z \pm z_i^{\text{beg}} \pm 2h_2 \pm H_n)^2; \\
B_{9,10} &= 2[M \mp (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}})(z \mp z_i^{\text{beg}} \pm 2h_2 \pm H_n)]; & C_{9,10} &= N + (z \mp z_i^{\text{beg}} \pm 2h_2 \pm H_n)^2; \\
B_{11,12} &= 2[M \mp (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}})(z \mp z_i^{\text{beg}} + H_n)]; & C_{11,12} &= N + (z \mp z_i^{\text{beg}} + H_n)^2; \\
B_{13} &= 2[M - (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}})(z - z_i^{\text{beg}} - H_n)]; & C_{13} &= N + (z - z_i^{\text{beg}} - H_n)^2; \\
B_{14,15} &= 2[M \pm (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}})(z \pm z_i^{\text{beg}} \mp 2h_1 - 2h_2 - H_n)]; & C_{14,15} &= N + (z \pm z_i^{\text{beg}} \mp 2h_1 - 2h_2 - H_n)^2; \\
B_{16} &= 2[M + (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}})(z + z_i^{\text{beg}} - 2h_1 + H_n)]; & C_{16} &= N + (z + z_i^{\text{beg}} - 2h_1 + H_n)^2; \\
B_{17,18} &= 2[M \mp (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}})(z \mp z_i^{\text{beg}} \mp 2h_1 \pm 2h_2 + H_n)]; & C_{17,18} &= N + (z \mp z_i^{\text{beg}} \mp 2h_1 \pm 2h_2 + H_n)^2; \\
B_{19} &= 2[M + (z_i^{\text{end}} - z_i^{\text{beg}})(z + z_i^{\text{beg}} - 2h_2 + H_n)]; & C_{19} &= N + (z + z_i^{\text{beg}} - 2h_2 + H_n)^2; \\
M &= (x_i^{\text{end}} - x_i^{\text{beg}})(x_i^{\text{beg}} - x) + (y_i^{\text{end}} - y_i^{\text{beg}})(y_i^{\text{beg}} - y); & N &= (x_i^{\text{beg}} - x)^2 + (y_i^{\text{beg}} - y)^2.
\end{aligned}$$

В соответствии с принципом суперпозиции полей суммарный потенциал в точке P , создаваемый всеми электродами числом Q_{con} , можем представить в виде

$$\varphi = \sum_{i=1}^{Q_{con}} \varphi_i = \sum_{i=1}^{Q_{con}} (k_i' j_i^{\text{beg}} + k_i'' j_i^{\text{end}}), \quad (7)$$

где k_i' и k_i'' – коэффициенты при j_i^{beg} и j_i^{end} в пунктах (а) – (к).

Таким образом, полученные выражения приведены к виду [4], что позволяет использовать для трехслойной модели соответствующие формулы для двухслойной с целью определения потенциала, создаваемого системой заземлителей, и сохранить существующий алгоритм расчета. Учитывая, что остальная часть алгоритма остается неизменной по сравнению с двухслойной моделью, такой подход позволяет снизить временные затраты на построение тестовой и рабочей программ для расчета НПЗУ.

Апробация разработанной математической модели.

Для проверки на практике справедливости полученных выражений и сделанных допущений были проведены измерения на 20 действующих электрических подстанциях классом напряжения 35 кВ, входящих в состав одного из облэнерго Украины (таблица). Полученные результаты значений сопротивления ЗУ подстанций, определенные экспериментальным путем, сравнивались с расчетными значениями, полученными с помощью тестовой программы на основе разработанной математической модели.

Название подстанции	R_e , Ом	R_c , Ом	δ , %	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	ρ_3 , Ом·м	h_1 , м	h_2 , м
SB №1	1,06	1,136	7,2	460	37,8	77	0,5	6,6
SB №2	1,12	1,206	7,7	550	36	46	0,4	4,2
SB №3	0,95	1,032	8,6	350	45	77	0,4	4,0
SB №4	2,80	2,833	1,2	200	62	450	0,4	8,4
SB №5	7,2	7,543	4,8	1250	1770	130	0,4	1,4
SB №6	0,775	0,849	9,5	41	59	33,5	0,3	2,0
SB №7	1,16	1,218	5,0	166,5	38	90	0,5	6,1
SB №8	0,56	0,5713	2,0	102	44	13	0,6	5,2
SB №9	2,37	2,465	4,0	610	31	115	0,6	1,5
SB №10	2,6	2,746	5,6	65	450	80	0,7	1,7
SB №11	1,15	1,227	6,7	108	50	24	0,9	4,9
SB №12	0,60	0,6017	0,3	27	41	15	1,3	12,8
SB №13	0,697	0,7046	1,1	66	36,3	16,5	1,4	19,4
SB №14	0,70	0,7349	5,0	44	28	50	1,4	13,2
SB №15	0,62	0,644	3,9	53	28	15	1,9	9,2
SB №16	0,898	0,9515	6,0	49,8	19	220	1,9	15,9
SB №17	1,37	1,372	0,1	47,7	136	60,8	2,0	9,1
SB №18	0,9	0,9637	7,1	91	29	41,8	2,1	12,6
SB №19	2,6	2,662	2,4	47	800	250	2,4	4,1
SB №20	0,68	0,694	2,1	28,5	17	120	7,0	11,0

Измерения сопротивления ЗУ (R_e) были выполнены по однолучевой схеме методом амперметра-вольтметра. Исходными данными для расчета сопротивления ЗУ (R_c) были удельное сопротивление ρ_i и глубина границы раздела слоев h_i , полученные при проведении вертикального электрического зондирования грунта установкой Веннера в месте расположения подстанции, а также схема ЗУ, определенная индукционным

методом [1]. Электрофизические параметры грунта, результаты расчета и экспериментальные значения, а также значения относительной погрешности для исследуемых объектов приведены в таблице. Используются условные названия подстанций.

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что максимальная погрешность определения сопротивления ЗУ расчетным способом на основании полученных выражений не превышает 10 % в сравнении с экспериментальным.

Выводы.

1. Предложены аналитические выражения для определения электрического потенциала и расчета поля, создаваемого заземляющим устройством произвольной конфигурации, расположенного в любом из слоев трехслойного грунта.

2. Полученное в работе аналитическое решение полевой задачи позволило использовать существующий алгоритм расчета для двухслойного грунта и построить тестовую программу для определения нормируемых параметров ЗУ с учетом трехслойной геоэлектрической структуры.

3. Проведено тестирование полученных выражений и внедрение результатов на действующих электрических подстанциях класса напряжения 35 кВ, получена хорошая сходимость аналитического решения и экспериментальных данных (погрешность расчета не выше 10%).

1. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009. Київ, Мінпаливенерго України, 2010, 54 с.

2. IEEE Std 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York, IEEE, 2012. 86 p.

3. Зубов К.Н. Совершенствование расчетных методов молниезащиты и заземляющих устройств в неоднородных грунтах: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03. Липецкий государственный технический университет. Вологда. 2011. 158 с.

4. Колиушко Д.Г. Совершенствование диагностики заземляющих устройств электроэнергообъектов: дис. ...канд. техн. наук: 05.11.13. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Харьков. 2003. 172 с.

5. Uma U.U., Uzoehi L.O. and Robert B.J. Optimization design of ground grid mesh of 132/33 kv substation using Etap. *Nigerian Journal of Technology*. 2016. 35.4. Pp. 926-934.

6. Колиушко Д.Г., Руденко С.С., Колиушко Г.М. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 3. С. 67-72. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.3.10>.

7. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Математическая модель заземляющего устройства энергообъекта при наличии подстилающего слоя. *Електронне моделювання*. 2014. № 2. С. 89-97.

8. Шишигин С.Л. Разработка методов анализа и синтеза электромагнитных полей электротехнических устройств с сильными токами: дис. ...докт. техн. наук: 05.09.05. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Санкт-Петербург. 2010. 217 с.

9. Коровкин Н.В., Шишигин С.Л. Расчетные методы в теории заземления. *Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та*. 2013. № 1. С. 74-79.

10. Борисов Р.К., Горшков А.В., Жарков Ю.В., Колечицкий Е.С., Шамшетдинов К.Л. Заземляющие устройства электроустановок (требования нормативных документов, расчет, проектирование, конструкции, сооружение). Москва: Издательский дом МЭИ, 2013. 360 с.

11. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Электрическое поле точечного источника тока в земле с трехслойной структурой. *Електронне моделювання*. 2011. № 6. С. 101-111.

УДК 621.316.99

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ, ЩО СТВОРЮЄТЬСЯ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИМ ПРИСТРОЄМ У ТРИШАРОВОМУ ГРУНТІ

Д.Г. Коліушко, канд.техн.наук, С.С. Руденко

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",

вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна,

e-mail: nio5_molniva@ukr.net

Робота присвячена визначенню аналітичних виразів для потенціалу електричного поля, створеного системою заземлювачів довільної конфігурації з урахуванням тришарової геоелектричної структури. Визначення потенціалу проводиться на основі рішення задачі про потенціал точкового джерела струму з урахуванням лінійного розподілу струму по довжині електрода, а також методу аналогії між електростатичним полем і полем, створеним квазіпостійним джерелом струму. Сумарний потенціал системи заземлювачів визначається за допомогою принципу суперпозиції полів. У роботі отримано аналітичні вирази для визначення в довільній точці спостереження потенціалу, створеного полем відокремленого електрода. Отримані вирази дозволяють

без застосування методу еквівалентування проводити розрахунок заземлювальних пристроїв та визначити їхні нормовані параметри для переважної більшості енергооб'єктів України класом напруги 35–750 кВ. Застосування аналітичного рішення дозволяє значно підвищити точність розрахунку електричного потенціалу в порівнянні з моделями, побудованими на підставі методів оптичної аналогії або кінцевих різниць.

Бібл. 11, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, електричний потенціал, тришаровий ґрунт, нормовані параметри, точкове джерело струму.

DETERMINATION THE ELECTRICAL POTENTIAL OF A CREATED GROUNDING DEVICE IN A THREE-LAYER GROUND

D.G. Koliushko, S.S. Rudenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine,

e-mail: nio5_molniva@ukr.net

The work is devoted to the definition of analytical expressions for the electric field potential created by a system of grounding devices of arbitrary configuration taking into account a three-layer geoelectrical structure. The potential is determined on the basis of the solution of the problem of the potential of a point source of current, taking into account the linear distribution of the current along the length of the electrode, and also the method of analogy between the electrostatic field and the field created by a quasi-constant current source. The total potential of the grounding system is determined using the superposition principle of the fields. Analytic expressions are obtained for the determination of the potential at an arbitrary observation point created by the field of a solitary electrode. The received expressions allow to calculate the grounding devices without application of the equivalent method and to determine their normalized parameters for the vast majority of power objects of Ukraine with the voltage class of 35–750 kV. The application of the analytical solution makes it possible to significantly improve the accuracy of calculating the electric potential in comparison with models based on the methods of optical analogy or finite differences.

References 11, table 1, figure 1.

Keywords: grounding device, electrical potential, a three-layer soil, rated parameters, a point source of current.

1. Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009. Kyiv, Minpalyvenerho Ukrainy, 2010. 54 p. (Ukr)
2. IEEE Std 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York, IEEE, 2012. 86 p.
3. Zubov K.N. Improved computational methods for lightning protection and grounding devices in heterogeneous soil: author's abstract of Can. tech. sci. diss. 05.09.03. Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. Vologda. 2011. 158 p. (Rus)
4. Koliushko D.G. Improving the diagnosis of grounding devices elektroenergoobektov: author's abstract of Can. tech. sci. diss. 05.11.13. Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet Kharkivskiy Polytekhnichnyi Instytut. Kharkiv. 2003. 172 p. (Rus)
5. Uma U.U., Uzoechi L.O., and Robert B.J. Optimization design of ground grid mesh of 132/33 kv substation using Etap. *Nigerian Journal of Technology*. 2016. 35.4. Pp. 926-934.
6. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. *Electrical engineering & electromechanics*. 2015. No 3. Pp. 63-66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.3.10>.
7. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Mathematical model of grounding connection of a power plant with under layer. *Elektronnoe modelirovanie*. 2014. No 2. Pp. 89-97. (Rus)
8. Shishigin S.L. Development of methods for the analysis and synthesis of electromagnetic fields of electrical devices with high currents: author's abstract of Dr. tech. sci. diss. 05.09.05. Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet. Sankt-Peterburg. 2010. 217 p. (Rus)
9. Korovkin N.V., Shishigin S.L. Computational methods in the theory of grounding. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. No 1. Pp. 74–79. (Rus)
10. Borisov R.K., Gorshkov A.V., Zharkov Yu.V., Kolechitskiy E.S., Shamshetdinov K.L. The grounding system of electrical installations (regulatory requirements, calculation, design, construction: Handbook. Moskva. Izdatelskii dom MEI. 2013. 360 p. (Rus)
11. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Electric field of a point source of current in the ground with a three-layer structure. *Elektronnoe modelirovanie*. 2011. No 6. Pp. 101-111. (Rus)

Надійшла 22.03.2017

Остаточний варіант 02.04.2018