

УДК 621.316.1

**Алгоритм подбора сопротивления заземления
в вертикально-слоистых моделях грунта**

Морозова А.Э., Рыжков Н.С., Дроздовская Е.В., Гедройть В.В., Мурачёв К.А.
Научный руководитель – ст. препод. СЕКАЦКИЙ Д.А.

Введение. Однородная почва – это только идеальный случай, который практически не возможен. Некоторые авторы разработали модели неоднородного грунта и на основе модифицирования формулы Шварца предложили теоретическую формулу сопротивления заземления для двухслойных моделей почвы, чтобы быстро рассчитать сопротивление заземления заземляющего тела в многослойных моделях грунта.

Методы расчета силового заземляющего сопротивления.

Для традиционного алгоритма расчета сопротивления заземления при проектировании ЛЭП используются формулы, рекомендуемые в различных стандартах для расчета сопротивления заземления простых заземляющих элементов. Рисунок 1 показывает комплексное заземляющее устройство, состоящее из заземляющих колец и горизонтальных лучей.

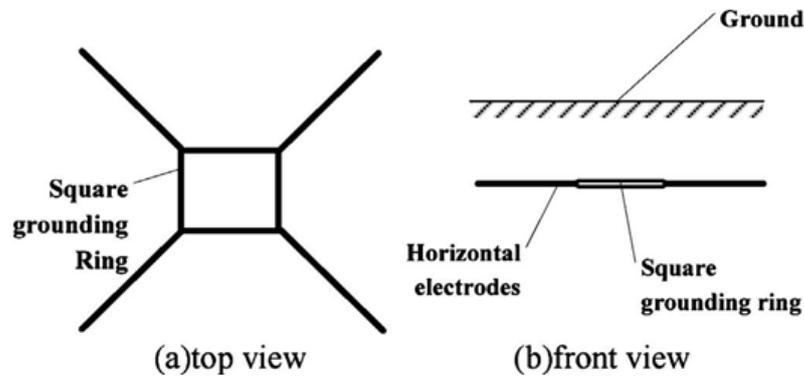


Рисунок 1 – Устройство заземления башни

Метод удельного сопротивления.

Потенциальные уравнения каждого заземления можно получить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 &= R_{11}I_1 + R_{12}I_2 + \dots + R_{1n}I_n & \varphi_1 &= \varphi_2 = \dots = \varphi_n = \varphi \\
 \varphi_2 &= R_{21}I_1 + R_{22}I_2 + \dots + R_{2n}I_n & I_1 &= I_2 = \dots = I_n = I \\
 \dots & & R_{ij} &= R_{ji} \\
 \varphi_n &= R_{n1}I_1 + R_{n2}I_2 + \dots + R_{nn}I_n
 \end{aligned}$$

Алгоритм, основанный на функциях Грина

Чтобы точно рассчитать сопротивление заземления, заземляющий электрод делится на n бесконечно малых элементов. Для этого используются формулы вида:

$$L = \sum_{j=1}^n L_j \quad V_P = \iint_S G(P, Q) J(Q) dS \quad V_P = \sum_{j=1}^n G(P, O_j) I_j$$

$$I = \sum_{j=1}^n I_j \quad V_P = \sum_{j=1}^n R_{ij} I_j$$

Требуется много времени для расчета сопротивления заземления с использованием функций Грина; эти функции могут быть довольно сложным в плоско-слоистых модельных песках, даже больше чем в многомерных моделях сложных грунтов.

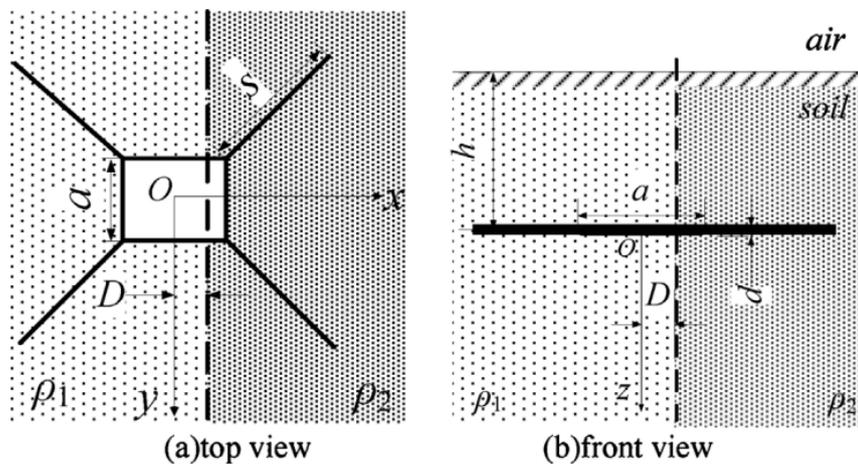


Рисунок 2 – Слоистая структура почвы и структура устройства заземления башни

Почва делится на два вертикальных слоя. Заземляющее устройство погружено в один слой на глубине h , местоположение границы раздела грунтов обозначено штриховой линией, а D - расстояние линии до геометрического центра заземляющего устройства от границы раздела между двумя слоями грунта.

Кривая подбора сопротивления заземления в вертикально-слоистом грунте.

Если задать X как абсциссу, а Y как ординату значения различного удельного сопротивления грунтовых слоев (кривая X - Y) будет построена, как показано на рисунке 3

l = 100 m		l = 200 m		l = 300 m		l = 400 m	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1.3154	1.5	1.1780	1.33	1.1185	1.25	1.0875
3	1.4880	2	1.3141	1.67	1.2272	1.5	1.1781
4	1.5952	2.5	1.4124	2	1.3122	1.75	1.2522
5	1.6607	3	1.4866	2.33	1.3814	2	1.3142
6	1.7142	3.5	1.5432	2.67	1.4367	2.25	1.3664
7	1.7521	4	1.5905	3	1.4841	2.5	1.4124
8	1.7797	4.5	1.6291	3.33	1.5237	-	-
9	1.8035	5	1.6587	-	-	-	-
10	1.8214	-	-	-	-	-	-

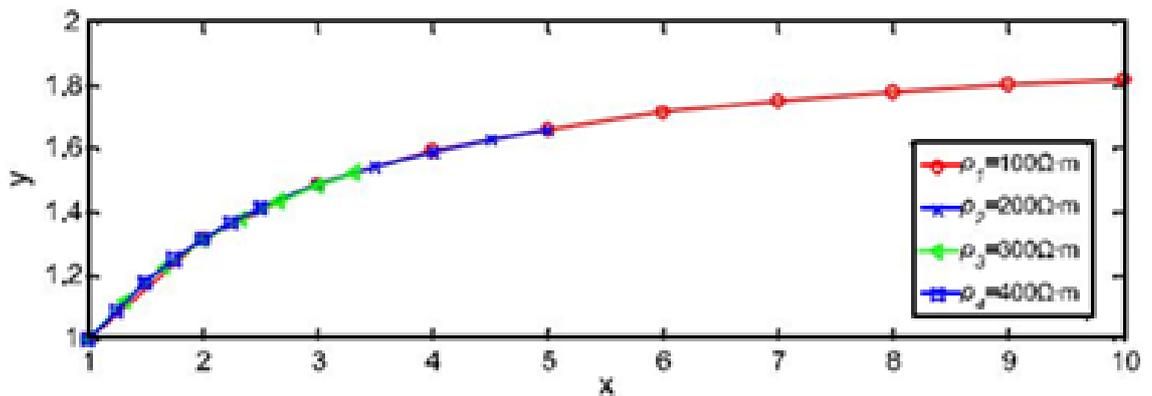


Рисунок 3 – Значения различного удельного сопротивления грунтовых слоев

Коэффициенты этих трех функций рассчитываются методом наименьших квадратов. Используя эти функции, кривая строится, как показано на рисунке 4.

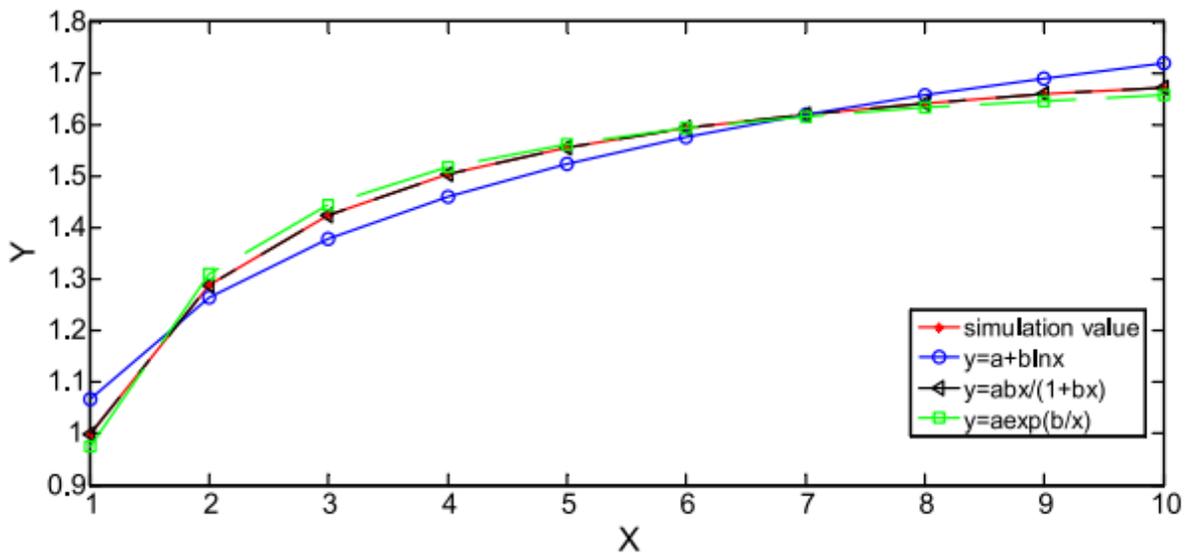


Рисунок 4 – Сравнение между тремя видами кривой соответствия функции и кривая истинного значения

Таблица 1 – Коэффициенты для трех подходящих функций.

Функция подгонки	a	b
Гиперболическая функция $y = \frac{abx}{1 + bx}$	1.8072	1.2380
Экспоненциальная функция $y = ae^{b/x}$	1.7577	-0.5892
Логарифмическая функция $y = a + b \ln x$	1.0676	0.2833

Заключение

1) По сравнению с другими алгоритмами точность подбора алгоритма достигает 99% при точных значениях R_{∞} и R_1 , или 90% при R_{∞} и R_1 , рассчитанных по эмпирической формуле.

2) Расчет сопротивления заземления башни в модели многослойного грунта с использованием предложенной формулы подгонки позволяет избежать моделирования сложного грунта и расчета комплексной интеграции в точных алгоритмах. Метод быстрый, точный на техническом уровне и простой в использовании.

3) Полученная формула подгонки подходит для расчета обычного кругового заземляющего устройства с горизонтальными лучами в вертикально-слоистом двухслойном грунте для инженерных практик.

Литература

1. IEEE Standard 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE, Inc., New York, 2000.
2. Nahman, J. Salamon, D. Analytical expression for the resistance of Rodbeds and of combined groundings systems in nonuniform soil, IEEE Trans. Power Deliv. 1 (3) (1986) 90–96.