

таким сопротивлением выполняются сравнительно просто: цепь, соприкасающаяся с грунтом на длине 0,1 – 50 см, сошник или диск, врезающиеся в грунт на глубину 0,5 – 15 см. Наибольшие из приведенных размеров соответствуют удельному сопротивлению грунта 10000 Ом·м (песок, скальный грунт) и току 10 мА (в нормальном режиме даже на крупных автобусах под ВЛ 1150 кВ ток более 8 мА не индуктируется).

Таким образом, мероприятия по устранению неблагоприятного действия наводок выполняются довольно легко и надежно. Этого пока не достигнуто в отношении снижения напряженности и устранения вредного влияния электростатического поля на человеческий организм.

В настоящий момент, пока не разработаны эффективные меры защиты населения от биологически вредного влияния электрического поля ВЛ СВН, параметры таких линий следует выбирать с учетом снижения напряженности электрического поля в зоне влияния ВЛ до безопасной величины.

Л и т е р а т у р а

1. Гончарик Е.П., Поспелов Г.Е. К оптимизации параметров проводов воздушных линий электропередачи переменного тока с помощью ЦВМ. – В сб.: Применение автоматики и вычислительной техники для повышения надежности и экономичности работы энергосистемы. Минск, 1971. 2. Гончарик Е.П., Тиняков Н.А. Некоторые вопросы проектирования линий электропередачи сверхвысокого напряжения. – "Изв. вузов. Энергетика". 1972, № 7.

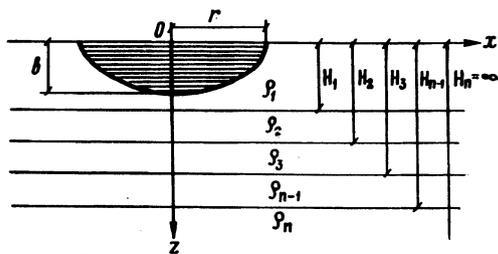
В.И. Глушко

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ ЗЕМЛИ

Точное решение задачи расчета заземлений в неоднородном грунте сопряжено с большими математическими трудностями. В связи с этим актуальной становится задача разработки упрощенных методов расчета заземлений в неоднородной среде. В данной работе излагается один из возможных путей решения этой задачи.

Рассмотрим предельную модель заземлителя в виде половины эллипсоида вращения, помещенную в многослойное проводящее полупространство с границами раздела между слоями, па-

Рис. 1. Предельная модель заземлителя в многослойной электрической структуре земли.



параллельными поверхности земли, и постоянными удельными сопротивлениями в пределах каждого слоя (рис. 1). Такое расположение границ раздела между слоями относительно заземлителя не влияет на общность основных положений излагаемого метода расчета, так как слои земли, пересекаемые заземлителем, с достаточным для практических целей приближением могут быть приведены к одному эквивалентному слою [1].

Для сосредоточенного заземлителя, опирающегося малой осью на поверхность земли, b , r есть его длина и радиус. Для сложного заземлителя

$$b = l + t, \quad r = \sqrt{\frac{S}{\pi}},$$

где S - площадь, занимаемая заземлителем; l - длина вертикальных элементов; t - глубина заложения сетки.

Многослойная среда относительно помещенного в нее источника тока может рассматриваться как анизотропная среда, характеризующаяся так называемым эллипсоидом анизотропии, полуоси ρ_x , ρ_y , ρ_z которого представляют собой результат макроскопического усреднения электрической структуры неоднородной среды [2].

Для рассматриваемого случая нормаль к границам раздела слоев совпадает с осью z (рис. 1). Тогда для плотности тока вдоль осей получим

$$j_x = \frac{1}{\rho_x} E_x, \quad j_y = \frac{1}{\rho_y} E_y, \quad j_z = \frac{1}{\rho_z} E_z. \quad (1)$$

С учетом этого дифференциальное уравнение непрерывности, которым описывается поле стекающего с заземлителя тока, запишется в виде

$$\operatorname{div} j = \frac{1}{\rho_x} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho_y} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho_z} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

Полученное потенциальное уравнение может быть приведено к уравнению Лапласа путем введения новых, неравномасштабных координат

$$\varepsilon = x \sqrt{\rho_x}, \quad \xi = y \sqrt{\rho_y}, \quad \eta = z \sqrt{\rho_z}. \quad (3)$$

Получим

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \varepsilon^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \eta^2} = 0, \quad (4)$$

т.е. известное уравнение Лапласа для однородной среды. Чтобы получить решение в заданной неоднородной среде необходимо после деформации пространства в соответствии с (3) привести ее к однородной изотропной среде, найти решение обычным путем, после чего, производя деформацию, обратную первоначальной, осуществить решение в исходной неоднородной среде.

Следует заметить, что использование уравнения (4) для расчета сплюснутых предельных моделей наиболее легко осуществляется для моделей в виде круглой пластины. При расчете сплюснутых объемных моделей может быть использовано решение для круглой пластины, если произвести замену объемной модели эквивалентной (в смысле сопротивления) моделью в виде круглой пластины.

Учитывая сказанное и то, что поле в нашем случае симметрично относительно оси z , из (4) для сопротивления предельной модели заземлителя получим:

а) сплюснутый полуэллипсоид вращения

$$R = \frac{\sqrt{\rho_x \rho_z}}{2\pi \sqrt{r^2 - b^2}} \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - b^2}}{r}, \quad (5)$$

б) вертикальный вытянутый полуэллипсоид вращения

$$R = \frac{\rho_x}{4\pi \sqrt{b^2 - r^2} \frac{\rho_x}{\rho_z}} \ln \frac{b + \sqrt{b^2 - r^2 \frac{\rho_x}{\rho_z}}}{b - \sqrt{b^2 - r^2 \frac{\rho_x}{\rho_z}}}. \quad (6)$$

Известно [2], что ρ и ρ_x характеризуют анизотропные свойства многослойной структуры земли соответственно по направлению нормали к границам раздела слоев и по направлению вдоль слоев. Это значит, что задача определения ρ_z непосредственно связана с задачей расчета поля заземлителя, помещенного в многослойную структуру, границы раздела слоев которой совпадают с эквипотенциальными поверхностями заземлителя в однородной земле.

Для этого случая потенциальное уравнение имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{1}{\rho} \frac{U^2 - z_0^2}{z_0^2} \frac{\partial \varphi}{\partial U} \right) = 0, \quad (7)$$

где U - естественная координата; z_0 - координата "характерной" точки заземлителя, которая в нашем случае может быть принята равной половине полуфокусного расстояния.

Из решения уравнения (7) для ρ_z и ρ_x получим

$$\rho_z = \rho_1 G_1 + \sum_{i=2}^n \rho_i (G_i - G_{i-1}), \quad (8)$$

$$\rho_x = \frac{G_1}{\frac{\rho_1}{\rho_z} + \sum_{i=2}^n \frac{G_i - G_{i-1}}{\rho_i}}. \quad (9)$$

Функции G_i равны:

а) сплюснутый полуэллипсоид вращения

$$G_i = 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{r_{\text{Э}} \sqrt{\frac{\rho_x}{\rho_z}}}{\sqrt{2H_i^2 + r_{\text{Э}}^2 \frac{\rho_x}{\rho_z}}}, \quad (10)$$

где

$$r_{\text{Э}} = \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{r^2 - b^2}}{\arcsin \sqrt{r^2 - b^2}}; \quad (11)$$

б) вытянутый полуэллипсоид вращения

$$G_i = 1 - \frac{\ln \frac{\sqrt{2H_i + \sqrt{b^2 - r^2}} \frac{\rho_x}{\rho_z}}{\sqrt{2H_i - \sqrt{b^2 - r^2}} \frac{\rho_x}{\rho_z}}}{2 \ln \left(\frac{2b}{r} \sqrt{\frac{\rho_z}{\rho_x}} \right)}. \quad (12)$$

Система уравнений (8), (9) не может быть в явном виде разрешена относительно неизвестных ρ_x и ρ_z , поэтому искомое решение может быть получено при помощи итерационного метода.

Рассмотренный метод расчета проверялся на примерах физического моделирования и реальных объектах. Было установлено хорошее совпадение расчетных и измеренных данных (максимальная погрешность не превышает 20%).

Л и т е р а т у р а

1. Якобс А.И. Приведение многослойной электрической структуры земли и эквивалентной двуслойной при расчете сложных заземлителей. "Электричество", 1970, №8. 2. Бурсиан В.Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электро-разведке. М., 1972.