

нами удельных ущербов и потерь энергии. Данное обстоятельство позволяет рассчитывать не всю матрицу, а только один ее столбец, что дает возможность сократить размерность динамической задачи, если для каждого года оптимизируемого периода выбрать экстремальные значения неопределенных факторов. При этом следует иметь в виду, что для критерия минимума затрат экстремальные значения соответствуют максимальным величинам неопределенных факторов. Выбор оптимального решения должен осуществляться так же, как и для детерминированной постановки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К вопросу выбора оптимального текущего плана развития электрической сети/ Л.П. П а д а л к о, А.И. Б а р а н н и к о в, Н.Н. Н и к о л ь с к а я и др. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1977, № 2, с. 121—125. 2. Л а н г е О. Оптимальные решения. — М.: Прогресс (пер. с польского), 1967. — 285 с. 3. Инструкция по определению экономической эффективности капиталовложений в развитие энергетического хозяйства (генерирование, передача и распределение электрической и тепловой энергии). — М.: Энергия, 1973. — 56 с.

УДК 621.316.99.001.24

А.Н. ШУЛЬГА, инженер (БО ЭСП)

### РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЕКАНИЮ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ В НЕОДНОРОДНОЙ ЗЕМЛЕ

В качестве сосредоточенных заземлителей рассмотрим горизонтальный заземлитель, вертикальный заземлитель и прямоугольную пластину, расположенные в неоднородной слоистой земле с удельными сопротивлениями слоев  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_n$  и их мощностями  $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_{n-1}$  ( $h_n = \infty$ ).

Определение сопротивления растеканию заземлителей будем выполнять по методу наведенных потенциалов [1]. При этом для упрощения последующего изложения материала предположим, что заземлители размещены в первом слое земли. Следует заметить, что рассмотрение этого частного случая не влияет на изложение сущности предлагаемого метода расчета. Кроме того, решение поставленной задачи применительно к такому расположению заземлителей имеет важное значение для практических расчетов заземляющих устройств электроустановок, так как горизонтальные заземлители (и пластины) в абсолютном большинстве случаев прокладываются в первом слое земли. Вертикальные заземлители также можно представить расположенными в первом слое земли, если учесть, что с допустимой для практических целей погрешностью пересекаемые ими слои могут быть заменены одним эквивалентным слоем с удельным сопротивлением  $\rho_{1з}$  [2].

Вывод расчетных соотношений для сопротивления растеканию заземлителей по методу наведенных потенциалов выполним на основе выражений для потенциала точечного источника тока, которое в системе координат  $x, y, z$  ( $x, y$  в плоскости поверхности земли) представляется в виде

$$U_T = U_{T_0} + \frac{I_T \rho_1}{4\pi} \int_0^{\infty} W(m) I_0(mr) dm, \quad (1)$$

где  $I_T$  — ток точечного источника;  $U_{T_0}$  — потенциал, наводимый точечным источником в однородном грунте;  $I_0(mr)$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$$W(m) = \frac{1}{2} (R(m)_1 - 1) (e^{mz} + e^{-mz}) (e^{m\eta} + e^{-m\eta});$$

$R(m)_1$  — пространственная характеристика среды;  $\eta$  — глубина расположения точечного источника тока.

Ток  $I_T$  определим, предполагая, что ток заземлителя  $I_3$  равномерно распределяется по длине горизонтального и вертикального заземлителей  $l$  и площади пластины  $A \times B$  (где  $A$  и  $B$  стороны пластины). Будем иметь

$$I_T = \frac{I_3}{l}; \quad I_T = \frac{I_3}{AB}.$$

Функция  $R(m)_1$  вычисляется по рекуррентной формуле [3]

$$R(m)_i = \frac{1 + \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R(m)_{i+1} - \left(\frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R(m)_{i+1} - 1\right) e^{-2mh_i}}{1 + \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R(m)_{i+1} - \left(\frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R(m)_{i+1} - 1\right) e^{-2mh_i}};$$

$$R(m)_n = 1.$$

В соответствии с методом наведенных потенциалов, используя (1), сопротивления растеканию горизонтального заземлителя  $R_{\Gamma}$ , вертикального заземлителя  $R_B$  и пластины  $R_{\Pi}$  будут иметь следующие выражения:

$$R_{\Gamma} = R_{\Gamma_0} + \frac{\rho_1}{2\pi l^2} \int_0^{\infty} (R(m)_1 - 1) ch^2(mt) \iint_{00}^{ll} J_0(m\sqrt{(x_i - x_j)^2 + r^2}) dx_i dx_j dm; \quad (2)$$

$$R_B = R_{B_0} + \frac{\rho_1}{2\pi l^2} \int_0^{\infty} (R(m)_1 - 1) J_0(mr_0) \int_t^{t+l} \int_t^{t+l} ch(mz) ch(m\eta) dz d\eta dm; \quad (3)$$

$$R_{\Pi} = R_{\Pi 0} + \frac{\rho_1}{2\pi A^2 B^2} \int_0^{\infty} (R(m)_1 - 1) \operatorname{ch}^2(mt) \int_0^A \int_0^B \int_0^A \int_0^B (m \sqrt{x_i - x_j})^2 + (y_i - y_j)^2 dx_i dx_j dy_i dy_j dm, \quad (4)$$

где  $t$  — глубина заложения горизонтального заземлителя, пластины и верхнего конца вертикального заземлителя;  $r_0$  — радиус горизонтального и вертикального заземлителей;  $R_{Г0}$ ,  $R_{В0}$ ,  $R_{\Pi 0}$  — сопротивления растеканию в однородной земле с удельным сопротивлением  $\rho_1$  соответственно горизонтально, вертикально заземлителя и прямоугольной пластины.

К настоящему времени расчетные выражения в явном виде для определения сопротивления растеканию получены только для случая двухслойной земли [4]. В случае многослойной земли расчетные соотношения могут быть получены в форме многократных бесконечных рядов, однако практическая реализация таких алгоритмов невозможна из-за весьма большого объема вычислительной работы.

Для практической реализации выражений (2) — (4) в данной работе предлагается следующий подход, который основывается на двух положениях: первое — интегралы с конечными пределами вычисляются формальными методами; второе — вычисление интегралов с бесконечными пределами осуществляется численными методами.

Вычисление определенных интегралов в (3) не представляет затруднений. Для вычисления аналогичных интегралов в (2) и (4) представим функцию Бесселя в виде ряда и, разложив подынтегральную функцию по формуле бинома Ньютона, произведем интегрирование. Тогда для выражений (2) — (4) получим:

$$R_{Г} = R_{Г0} + \frac{\rho_1}{2\pi l} \int_0^{\infty} \left(R\left(\frac{m}{l}\right)_1 - 1\right) \operatorname{ch}^2\left(\frac{mt}{l}\right) G\left(m, \frac{r_0}{l}\right) dm;$$

$$R_{В} = R_{В0} + \frac{\rho}{2\pi l^2} \int_0^{\infty} (R(m)_1 - 1) J_0(mr_0) [\operatorname{sh}(m(t+l)) - \operatorname{sh}(mt)]^2 dm;$$

$$R_{\Pi} = R_{\Pi 0} + \frac{\rho_1}{2\pi A} \int_0^{\infty} \left(R\left(\frac{m}{A}\right)_1 - 1\right) \operatorname{ch}^2\left(\frac{mt}{A}\right) P\left(m, \frac{B}{A}\right) dm;$$

где

$$G\left(m, \frac{r_0}{l}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{m^{2n}}{a^{2n} n!} \sum_{k=0}^n \frac{\left(\frac{r_0}{l}\right)^{2k}}{k! (n-k)! [2(n-k)+1] (n-k+1)}$$

$$P\left(m, \frac{B}{A}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} (1)^n \frac{m^{2n}}{2^{2n} n!} \sum_{\kappa=0}^n \frac{\left(\frac{B}{A}\right)^{2\kappa}}{\kappa! (n-\kappa)! [2n-\kappa+1] (n-\kappa+1)} \times$$

$$\frac{x}{(2\kappa+1)(\kappa+1)}; \quad (6)$$

$$\frac{B}{A} > 1.$$

Использование специальных функций  $G$  и  $P$  в расчетных алгоритмах в том виде, в каком они представлены выше, невозможно из-за большого расхода машинного времени на их вычисление.

Для реализации этих функций в программах расчета сопротивлений растеканию заземлителей предлагается использовать метод интерполяции, основанный на применении сплайн-функций. На основании результатов расчета функций  $G$  и  $P$  по формулам (5), (6) были построены кубические сплайны двух переменных в кусочно-многочленном представлении, которые затем используются в алгоритмах расчета сопротивлений растеканию рассмотренных заземлителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Эбин Л.Е., Якобс А.И. Применение метода наведенных потенциалов при расчете сложных заземлителей в неоднородных грунтах. — Электричество, 1964, № 6, с. 1–6.
2. Якобс А.И., Мишкин В.М. Расчет сопротивления вертикальных стержневых заземлителей, работающих в многослойной земле. — Электричество, 1972, № 9, с. 89–90.
3. Филатов В.А., Филатова В.Н. Вычисление кажущегося сопротивления в методе ВЭЗ при помощи ЭВМ. — Труды Сиб. научно-исслед. ин-та геологии, геофизики и минер. сырья. Новосибирск, 1975, вып. 215, с. 113–119.
4. Якобс А.И., Коструба С.И., Живаго В.Т. Расчет заземляющих устройств с помощью ЭВМ — Электричество, 1967, № 8, с. 21–27.

УДК 621.311.153.001

В.В. ПРОКОПЧИК, канд.техн.наук (ГПИ),  
Б.И. КУДРИН, канд.техн.наук (ГИПРОМЭЗ)

#### ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В связи с изменением порядка проектирования в настоящее время схемы электроснабжения предприятий разрабатываются на перспективу 5 и 10 лет. При этом данные по отдельным электроприемникам и их группам для предприятий отсутствуют. В условиях неполной информации проектировщик должен тем не менее определить основные показатели, характеризующие развитие и построение системы электроснабжения: общее электропотребление