

## Расчет электромагнитных параметров вертикального стержневого заземлителя

Герасимович Д. А., Дерюгина Е. А.

Белорусский национальный технический университет

Заземляющие устройства являются неотъемлемой частью электроэнергетических систем, влияющие на надежность их работы и на безопасность обслуживающего персонала.

Большинство предлагаемых методов и моделей расчета заземляющих устройств электроустановок основывается на модели потенциала постоянного тока и сводятся к расчету активного сопротивления заземляющего устройства [1, 2]. В реальных условиях в заземляющих устройствах протекают переменные токи промышленной частоты и импульсные токи, вызванные разрядами молний.

Для учета отмеченных факторов расчет электромагнитного поля уединенного вертикального стержневого заземлителя при протекании переменного тока промышленной частоты основан на системе уравнений Максвелла. Расчет электромагнитных параметров поля рассматривается на модели, которая состоит из самого стержневого заземлителя, переходного слоя растекания тока между землей и заземлителем и собственно земли. Каждому слою присущи свои электрические проводимости и магнитные проницаемости.

Электромагнитное состояние в каждом рассматриваемом слое описывается системой уравнений [3]:

$$\operatorname{rot} \vec{H}_i = \vec{\sigma}_i; \operatorname{rot} \vec{E}_i = -\frac{\partial \vec{B}_i}{\partial t}; \operatorname{div} \vec{\sigma}_i = 0; \operatorname{div} \vec{B}_i = 0; \quad (1)$$

$$\vec{B}_i = \mu_i \vec{H}_i; \vec{\sigma}_i = \gamma_i \vec{E}_i; \vec{D}_i = \varepsilon_i \vec{E}_i,$$

где  $\vec{H}_i$  и  $\vec{E}_i$  – векторы напряженности магнитного и электрического полей;  $\vec{\sigma}_i$  – вектор плотности тока;  $\vec{B}_i$  – вектор индукции магнитного поля;  $\vec{D}_i$  – вектор электрического смещения.

Дифференциальные уравнения поля для каждого слоя в установившемся режиме можно разрешить относительно любой из компонент поля (напряженности магнитного  $\vec{H}$  или электриче-

ского  $\vec{E}$  полей) [4]. При исследовании распределения тока систему уравнений целесообразно разрешить относительно напряженности электрического поля или относительно плотности тока  $\vec{\sigma}$ , связанной с  $\vec{E}$  законом Ома. С учетом отмеченного система уравнений (1) сводится к решению дифференциального уравнения:

$$\frac{\gamma_{ri}}{r} \frac{\partial \vec{\phi}_{im}}{\partial r} + \gamma_{ri} \frac{\partial^2 \vec{\phi}_{im}}{\partial r^2} + \gamma_{zi} \frac{\partial^2 \vec{\phi}_{im}}{\partial z^2} - \alpha^2 \vec{\phi}_{im} = 0; \quad \alpha^2 = j\omega\gamma_{ri}\gamma_{zi}\mu_{\phi i}, \quad (2)$$

где  $\vec{\phi}_{im}$  принимает значения векторов плотности тока или напряженностей электромагнитного поля ( $i = 1, 2, 3$ ).

На основе решения уравнения (2) для рассматриваемой модели заземлителя получаем выражения в виде ряда для определения вертикальной  $\dot{\sigma}_{imz}(r, z)$  и радиальной  $\dot{\sigma}_{imr}(r, z)$  составляющих вектора плотности тока. Для определения граничных условий предварительно были установлены зависимости радиального и вертикального токов от соответствующих координат.

Полное решение уравнения (2) представили суммой его частного решения и решения уравнения невязки. В соответствии с отмеченным получили выражения распределения радиальной и вертикальной составляющих вектора плотности тока:

$$\dot{\sigma}_{imr}(r, z) = \dot{\sigma}_{*imr}(r, z) + \Delta\dot{\sigma}_{imr}(r, z);$$

$$\dot{\sigma}_{imz}(r, z) = \dot{\sigma}_{*imz}(r, z) + \Delta\dot{\sigma}_{imz}(r, z),$$

где  $\dot{\sigma}_{*imr}(r, z)$  и  $\dot{\sigma}_{*imz}(r, z)$  – частные решения уравнения (2) для радиальной и вертикальной составляющих плотности тока;  $\Delta\dot{\sigma}_{imr}(r, z)$  и  $\Delta\dot{\sigma}_{imz}(r, z)$  – величины плотности тока от невязки.

Частное решение уравнения (2) позволяет представить составляющие вектора плотности тока в каждом слое при использовании разложения в ряд Фурье следующими выражениями:

$$\dot{\sigma}_{*imr}(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \dot{\sigma}_{imr}^k(0) \cdot e^{p_k r z} \cdot J_0\left(\lambda_k \frac{r}{R_3}\right);$$

$$\dot{\sigma}_{*imz}(r, z) = \gamma_{zi} \frac{h-z}{h} \dot{E}_{imz}^0(0) + \gamma_{zi} \sum_{k=1}^{\infty} \dot{E}_{imz}^k(r) \sin(k\omega_k z),$$

где  $\dot{\sigma}_{imr}^k$  и  $\dot{E}_{imz}^k$  – распределения  $k$ -х гармоник амплитуды

плотности тока и напряженности электрического тока;  $\lambda_k$  – корни функции Бесселя;  $p_{ikr}$  – постоянная затухания электромагнитного поля.

Величины плотности тока от невязки на границах раздела сред для радиальной и вертикальной составляющих вектора плотности тока определяются по следующим выражениям:

$$\Delta\dot{\sigma}_{imr}(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \Delta\dot{\sigma}_{imr}^k(r) \cos(k\omega_z z);$$

$$\Delta\dot{\sigma}_{imz}(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \Delta\dot{\sigma}_{imz}^k(0) e^{p'_{ikz} z} J_0\left(\lambda_k \frac{r}{R_i - R_{i-1}}\right),$$

где  $\Delta\dot{\sigma}_{imr}^k$  – распределения  $k$ -х гармоник амплитуды невязки плотности тока на границах раздела сред;  $p'_{ikz}$  – постоянная затухания электромагнитного поля;  $R_i$  – радиус  $i$ -го слоя модели.

Полученные выражения позволяют проводить расчет распределения радиальной и вертикальной составляющих вектора плотности тока в каждом слое модели и определять области растекания токов в заземлителе, а также активные и индуктивные параметры заземляющих устройств.

Разработана компьютерная программа, в которой реализован численный метод расчета электромагнитных параметров вертикального стержневого заземлителя.

Таким образом, разработанный численный метод и компьютерная программа могут быть использованы для решения инженерных задач, связанных с проектированием, расчетом и оценкой заземляющих устройств.

### Литература

1. Бургсдорф, В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 399 с.
2. Рябкова, Е. Я. Заземления в установках высокого напряжения / Рябкова. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.
3. Тамм, И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – 9-е изд. – М.: Наука, 1976. – 616 с.
4. Поливанов, К. М. Теоретические основы электротехники / К. М. Поливанов. – Ч. 3: Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1969.