

МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ ПРИ СТЕКАНИИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ МОЛНИИ

Канд. техн. наук **ГЕРАСИМОВИЧ Д. А.**, магистр техн. наук **ДЕРЮГИНА Е. А.**

*ООО «Электросити»,
Белорусский национальный технический университет*

Исследованию импульсных характеристик заземляющих устройств в последнее время уделяется большое внимание. Связано это, в первую очередь, с проблемой электромагнитной совместимости современных электроэнергетических объектов. Здесь, наряду с традиционными требованиями к защитному заземлению и заземлению грозозащиты, возникают вопросы выноса потенциала на цепи вторичной коммуникации.

При исследовании импульсных характеристик заземляющих устройств необходимо принимать во внимание ряд дополнительных факторов, связанных с большими величинами токов молнии и их быстрым изменением во времени. Большие величины токов требуют учета нелинейности вольт-амперных характеристик грунтов и пробоя грунта при достижении критической напряженности электрического поля в земле, а быстрое изменение токов молнии – электромагнитной составляющей и токов смещения в уравнениях поля (индуктивных и емкостных параметров заземлителей).

Одновременный учет перечисленных выше факторов является сложной задачей. Следует выделить исследования [1–3] импульсных характеристик простых заземлителей с учетом пробоя и нелинейности характеристик грунтов. Для анализа импульсных характеристик в них предлагается использовать фиктивный радиус заземлителя с учетом зоны искрообразования в грунте и импульсные коэффициенты для расчета сопротивлений. Исследования, учитывающие электромагнитные процессы в земле, базируются в основном на полевой модели [4–6] и модели линии с распределенными параметрами [1–3, 7–9]. Методы расчета импульсных характеристик на основе данных моделей разработаны для частных случаев протяженных заземлителей [1–3, 7], горизонтальных [8, 9] и вертикальных [4, 6] заземлителей конечной длины, а также для сетчатых заземлителей [5, 8]. Удельные параметры схемы замещения (индуктивность и емкость) в моделях линий с распределенными параметрами при этом взяты как для поля постоянного тока, что некорректно для быстро изменяющегося во времени электромагнитного поля в проводящей среде. Для учета пробоя и нелинейности вольт-амперных характеристик земли в этих моделях предлагается использовать импульсные параметры земли с учетом нелинейности и радиуса искрообразования [1–3, 8, 9]. Соответствующие уравнения при этом становятся нелинейными. Их решение трудноосуществимо и выполняется с рядом допущений.

Наряду с указанными расчетными методами в последнее время получили распространение экспериментальные исследования [10, 11]. Для генерации импульсных токов используют генераторы апериодических импульсов с заданными параметрами, а измерение напряжения на заземляющем устройстве выполняют импульсным вольтметром или цифровым осциллографом. Однако мощности генераторов импульсов не всегда достаточно для воспроизведения пробоя грунта, что может иметь место при реальном ударе молнии.

Анализ существующих методов расчета импульсных характеристик заземляющих устройств показывает, что универсальные и в то же время практически пригодные методы, учитывающие всю сложность протекающих в земле электромагнитных процессов, отсутствуют. В практике эксплуатации заземляющих устройств при этом необходимо использовать экспериментальные методы оценки импульсных характеристик. Дальнейшее развитие расчетных методов необходимо для качественной оценки импульсных характеристик заземляющих устройств и разработки практических рекомендаций для выбора конструкций заземляющих устройств на стадии проектирования.

Ниже предлагается метод расчета импульсных характеристик вертикального стержневого заземлителя конечной длины (рис. 1).

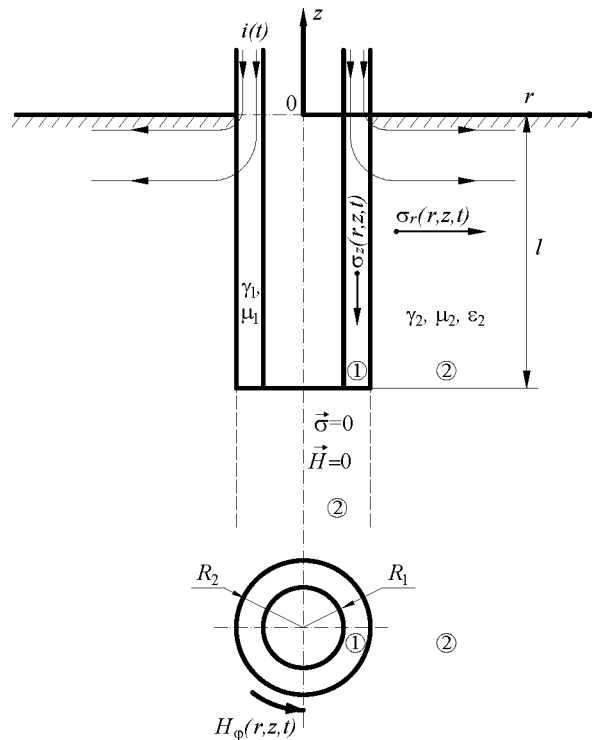


Рис. 1. Геометрическая модель вертикального стержневого заземлителя конечной длины

В [12] получены выражения для распределения параметров электромагнитного поля в земле и заземлителе в первом приближении при гармониче-

ском изменении тока с угловой частотой ω . Распределение комплексной амплитуды радиальной составляющей плотности тока в земле описывается выражением [12]

$$\dot{\sigma}_{2mr}(r, z) = \frac{\alpha_2 \dot{I}_m}{2\pi r} \begin{cases} e^{\alpha_2 z} + \frac{l(\operatorname{ch}(\alpha_2(z+l))/\operatorname{sh}(\alpha_2 l) - e^{\alpha_2 z})}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}}, r \in [R_2, \infty); z \in [0, -l]; \\ e^{\alpha_2 z} \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}} \right), r \in [R_2, \infty), z \in (-l, -\infty), \end{cases} \quad (1)$$

где $\alpha_2 = \sqrt{j\omega\gamma_2\mu_2}$; γ_2 , μ_2 – электрическая проводимость и магнитная проницаемость земли соответственно; \dot{I}_m – комплексная амплитуда тока, стекающего в заземлитель; l – длина заземлителя; R_2 – внешний радиус заземлителя.

Аналогичное выражение справедливо и для комплексной амплитуды угловой составляющей напряженности магнитного поля в земле

$$\dot{H}_{2m\varphi}(r, z) = \frac{\dot{I}_m}{2\pi r} \begin{cases} e^{\alpha_2 z} + \frac{l(\operatorname{sh}(\alpha_2(z+l))/\operatorname{sh}(\alpha_2 l) - e^{\alpha_2 z})}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}}, r \in [R_2, \infty), z \in [0, -l]; \\ e^{\alpha_2 z} \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}} \right), r \in [R_2, \infty), z \in (-l, -\infty). \end{cases} \quad (2)$$

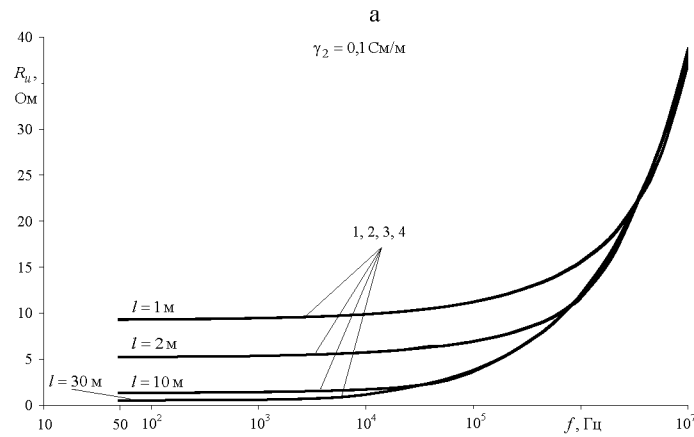
На основе (1), (2), а также аналогичных выражений для распределения параметров поля заземлителя в [12] получены приближенные формулы для расчета сопротивления растеканию тока в земле и сопротивления стержня заземлителя. Исследования показали, что первое приближение на основе (1), (2) дает незначительные отличия в сравнении с более точным численным методом расчета параметров поля для промышленной частоты. Зависимости сопротивлений при более высоких частотах, рассчитанные по приближенным формулам и более точно, иллюстрирует рис. 2. Их анализ показывает, что даже для частот порядка 10^7 Гц отличия не превышают 2 % (кривые 1–2 практически совпадают).

Таким образом, для дальнейшего расчета параметров импульсного электромагнитного поля можно основываться на первом приближении распределения параметров поля. Расчет параметров поля в импульсном режиме при этом целесообразно выполнить операторным методом. Для этого запишем (1), (2) в операторной форме:

$$\sigma_{2r}(r, z, p) = \frac{\alpha_2(p)I(p)}{2\pi r(1 + \varepsilon_2 p / \gamma_2)} \begin{cases} e^{\alpha_2(p)z} + \frac{l \left(\frac{\text{ch}(\alpha_2(p)(z+l))}{\text{sh}(\alpha_2(p)l)} - e^{\alpha_2(p)z} \right)}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}}, r \in [R_2, \infty); \\ e^{\alpha_2(p)z} \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}} \right), r \in [R_2, \infty); z \in (-l, -\infty); \end{cases} z \in [0, -l]; \quad (3)$$

$$H_{2\varphi}(r, z, p) = \frac{I(p)}{2\pi r} \begin{cases} e^{\alpha_2(p)z} + \frac{l \left(\frac{\text{sh}(\alpha_2(p)(z+l))}{\text{sh}(\alpha_2(p)l)} - e^{\alpha_2(p)z} \right)}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}}, r \in [R_2, \infty); z \in [0, -l]; \\ e^{\alpha_2(p)z} \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}} \right), r \in [R_2, \infty); z \in (-l, -\infty), \end{cases} \quad (4)$$

где $\sigma_{2r}(r, z, p)$, $H_{2\varphi}(r, z, p)$ – операторные изображения радиальной составляющей плотности тока и угловой составляющей напряженности магнитного поля в земле соответственно; $\alpha_2(p) = \sqrt{\gamma_2 \mu_2 p + \varepsilon_2 \mu_2 p^2}$; $I(p)$ – операторное изображение тока, стекающего в заземлитель; ε_2 – диэлектрическая проницаемость земли.



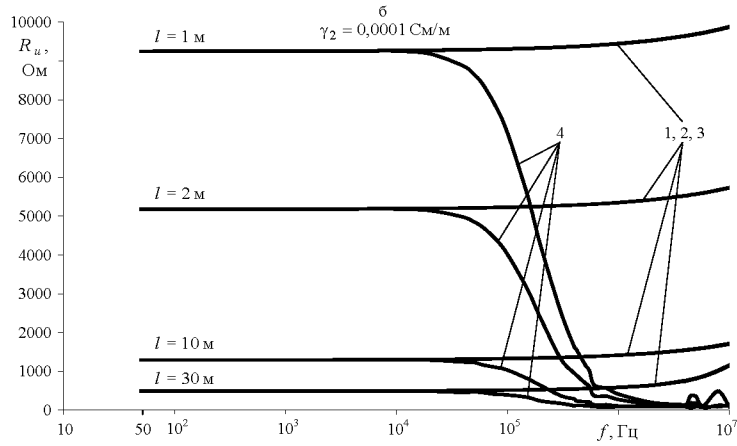


Рис. 2. Зависимость сопротивления R_u медного заземлителя радиуса $R_2 = 6$ мм от частоты f стекающего тока для: а – большой; б – малой проводимости земли; 1 – численный метод [12]; 2 – приближенные формулы; 3 – импульсный метод без учета токов смещения; 4 – импульсный метод с учетом токов смещения

Выражение (3) записано с учетом закона полного тока при наличии токов смещения в земле ($\partial H_\varphi / \partial z = (1 + \varepsilon_2 p / \gamma_2) \sigma_r$).

Нахождение мгновенных значений плотности тока и напряженности магнитного поля в земле сводится к построению соответствующих переходных функций и последующему использованию интеграла Дюамеля. Изображения переходных функций получаются при подстановке в (3), (4) изображения единичной ступени тока $I(p) = 1/p$ [13]. Тогда оригиналы можно записать следующим образом:

$$g_{\sigma_r}(r, z, t) = \frac{1}{2\pi r} \begin{cases} g_{1\sigma_r}(z, t) + \frac{l(g_{2\sigma_r}(z, t) - g_{1\sigma_r}(z, t))}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}}, r \in [R_2, \infty); z \in [0, -l], t \geq 0; \\ g_{1\sigma_r}(z, t) \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}} \right), r \in [R_2, \infty); z \in (-l, -\infty); \end{cases} \quad (5)$$

$$g_{H_\varphi}(r, z, t) = \frac{1}{2\pi r} \begin{cases} g_{1H_\varphi}(z, t) + \frac{l(g_{2H_\varphi}(z, t) - g_{1H_\varphi}(z, t))}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}}, r \in [R_2, \infty); z \in [0, -l], t \geq 0; \\ g_{1H_\varphi}(z, t) \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + (r - R_2)^2}} \right), r \in [R_2, \infty); z \in (-l, -\infty), \end{cases} \quad (6)$$

где оригиналу $g_{1\sigma_r}(z, t)$ соответствует изображение $G_{1\sigma_r}(z, p) = \frac{\alpha_2(p) e^{\alpha_2(p)z}}{p(1 + \varepsilon_2 p / \gamma_2)}$;

$$g_{2\sigma_r}(z, t) \square G_{2\sigma_r}(z, p) = \frac{\alpha_2(p) \text{ch}(\alpha_2(p)(z+l))}{p(1 + \varepsilon_2 p / \gamma_2) \text{sh}(\alpha_2(p)l)}$$

$$g_{1H_\varphi}(z, t) \quad \square \quad G_{1H_\varphi}(z, p) = \frac{e^{\alpha_2(p)z}}{p};$$

$$g_{2H_\varphi}(z, t) \quad \square \quad G_{2H_\varphi}(z, p) = \frac{\text{sh}(\alpha_2(p)(z+l))}{p \text{sh}(\alpha_2(p)l)}.$$

Оригиналы $g_{1\sigma_r}(z, t)$ и $g_{1H_\varphi}(z, t)$, учитывая, что $\alpha_2(p) = \sqrt{\gamma_2 \mu_2 p + \varepsilon_2 \mu_2 p^2}$, определяются по формулам [13]:

$$g_{1\sigma_r}(z, t) = \begin{cases} \gamma_2 \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} I_0 \left(\frac{\gamma_2 \sqrt{t^2 - \varepsilon_2 \mu_2 z^2}}{2\varepsilon_2} \right) e^{-\frac{\gamma_2 t}{2\varepsilon_2}}, & t > -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}; \\ 0, & t \leq -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}; \end{cases} \quad (7)$$

$$g_{1H_\varphi}(z, t) = \begin{cases} -\frac{\gamma_2 z}{2} \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} \int_{-z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}^t \frac{I_1 \left(\frac{\gamma_2 (t^2 - \varepsilon_2 \mu_2 z^2)}{2\varepsilon_2} \right) e^{-\frac{\gamma_2 t}{2\varepsilon_2}}}{\sqrt{t^2 - \varepsilon_2 \mu_2 z^2}} d\tau + e^{\left(\frac{\gamma_2 z}{2} \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}\right)}, & t > -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}; \\ 0, & t \leq -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}, \end{cases} \quad (8)$$

где I_0 , I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков соответственно.

Для нахождения оригиналов $g_{2\sigma_r}(z, t)$ и $g_{2H_\varphi}(z, t)$ используем теорему разложения [13]. Итоговые выражения для их определения имеют вид:

$$g_{2\sigma_r}(z, t) = \begin{cases} \frac{1}{l} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_2 t}{\varepsilon_2}} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \cos(k\pi z/l) (e^{p_k t} - e^{p_{2k} t})}{\sqrt{1 - 4k^2 \pi^2 \varepsilon_2 / (\mu_2 \gamma_2^2 l^2)}} \right), & t > -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}; \\ 0, & t \leq -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}; \end{cases} \quad (9)$$

$$g_{2H_\varphi}(z, t) = \begin{cases} \frac{z+l}{l} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(-1)^k e^{p_k t}}{k\pi + \frac{\gamma_2 \mu_2 l^2}{2k\pi} p_k} + \frac{(-1)^k e^{p_{2k} t}}{k\pi + \frac{\gamma_2 \mu_2 l^2}{2k\pi} p_{2k}} \right) \sin\left(\frac{k\pi(z+l)}{l}\right), & t > -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}; \\ 0, & t \leq -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{где } p_{1k} = -\frac{\gamma_2}{2\varepsilon_2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4k^2 \pi^2 \varepsilon_2}{\mu_2 \gamma_2^2 l^2}} \right); \quad p_{2k} = -\frac{\gamma_2}{2\varepsilon_2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4k^2 \pi^2 \varepsilon_2}{\mu_2 \gamma_2^2 l^2}} \right).$$

Зная переходные функции, находим мгновенные значения проекций векторов плотности тока и напряженности магнитного поля в земле с использованием интеграла Дюамеля [13]:

$$\sigma_{2r}(r, z, t) = \int_0^t i'(\tau) g_{\sigma_{2r}}(r, z, t - \tau) d\tau; \quad (11)$$

$$H_{2\varphi}(r, z, t) = \int_0^t i'(\tau) g_{H_{2\varphi}}(r, z, t - \tau) d\tau, \quad (12)$$

где $i'(\tau)$ – первая производная по времени тока, стекающего в заземлитель.

Интегралы (11), (12) записаны с учетом равенства нулю тока в начальный момент времени, $i(0) = 0$.

Таким образом, на основании выражений (5)–(12) рассчитываются параметры импульсного электромагнитного поля в земле.

Для расчета поля самого заземлителя учтем, что поверхностный эффект в нем при стекании импульсного тока ярко выражен, а токами смещения в металле можно пренебречь. Тогда электромагнитное поле заземлителя можно рассматривать как для полубесконечного проводящего пространства и операторные изображения для вертикальной проекции вектора плотности тока и угловой проекции вектора напряженности магнитного поля примут вид:

$$G_{1z}(r, z, p) = \alpha_1(p) H_{2\varphi}(R_2, z, p) e^{\alpha_1(p)(r-R_2)}, \quad z \in [0, -l]; \quad r \in [R_1, R_2]; \quad (13)$$

$$H_{1\varphi}(r, z, p) = H_{2\varphi}(R_2, z, p) e^{\alpha_1(p)(r-R_2)}, \quad z \in [0, -l]; \quad r \in [R_1, R_2], \quad (14)$$

где $\alpha_1(p) = \sqrt{\gamma_1 \mu_1 p}$; γ_1 , μ_1 – электрическая проводимость и магнитная проницаемость стержня заземлителя соответственно.

Переходные функции для этих проекций определяются по формулам [13]:

$$g_{\sigma_{1z}}(r, z, t) = \begin{cases} g_{H_{2\varphi}}(R_2, z, t) \sqrt{\frac{\gamma_1 \mu_1}{\pi t}} e^{-\frac{\gamma_1 \mu_1 (R_2 - r)^2}{4t}}, & t > -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}; \\ 0, & t \leq -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}; \end{cases} \quad (15)$$

$$g_{H_{1\varphi}}(r, z, t) = \begin{cases} g_{H_{2\varphi}}(R_2, z, t) \left(1 - \Phi \left(\frac{\sqrt{\gamma_1 \mu_1} (R_2 - r)}{2\sqrt{t}} \right) \right), & t > -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}; \\ 0, & t \leq -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}, \end{cases} \quad (16)$$

где Φ – функция Лапласа.

Мгновенные значения проекций векторов, как и для земли, определяем на основе интеграла Дюамеля:

$$\sigma_{1z}(r, z, t) = \int_0^t i'(\tau) g_{\sigma_{1z}}(r, z, t - \tau) d\tau; \quad (17)$$

$$H_{1\varphi}(r, z, t) = \int_0^t i'(\tau) g_{H_{1\varphi}}(r, z, t - \tau) d\tau. \quad (18)$$

По известным мгновенным значениям проекций векторов электромагнитного поля в земле и заземлителе находим импульсное сопротивление и напряжение на заземлителе. Как и для стационарного режима, расчет импульсных сопротивлений основан на применении вектора Пойнтинга. Импульсное сопротивление растеканию тока в земле рассчитываем по формуле

$$R_{с.н}(t) = \frac{2\pi}{\gamma_2 i^2(t)} \int_{R_2}^R r \sigma_{2r}(r, 0, t) H_{2\phi}(r, 0, t) dr, \quad (19)$$

где R – расстояние до заземлителя с обратным током.

Импульсное сопротивление стержня заземлителя

$$R_{с.н}(t) = \frac{2\pi R_2}{\gamma_1 i^2(t)} \int_{-l}^0 \sigma_{1z}(R_2, z, t) H_{1\phi}(R_2, z, t) dz. \quad (20)$$

Общее сопротивление

$$R_{н}(t) = R_{с.н}(t) + R_{с.н}(t). \quad (21)$$

Напряжение на заземлителе в импульсном режиме

$$U(t) = \frac{1}{\gamma_2} \int_{R_2}^R \sigma_{2r}(r, 0, t) dr. \quad (22)$$

На основании приведенных выражений в среде программирования MatLab разработана программа расчета импульсных характеристик вертикальных стержневых заземлителей. Программа позволяет выполнять расчеты при любой зависимости тока, стекающего в заземлитель. Для ее апробации были проведены расчеты установившихся значений сопротивлений при стекании синусоидального тока различной частоты $f = \omega/2\pi$ (кривые 3, 4, рис. 2). Свойства земли и заземлителя приняты, как и в [12]. Диэлектрическая проницаемость земли $\epsilon_2 = 10\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{11}$ Ф/м. Из приведенных зависимостей следует, что значения сопротивлений, рассчитанные методом [12] для установившегося режима, по приближенным формулам и разработанной программе для импульсного режима без учета токов смещения практически совпадают (отличия не превышают 5 %). Аналогичные результаты были получены для заземлителей других радиусов, а также для стальных заземлителей.

Следует отметить влияние токов смещения на частотную характеристику сопротивлений заземлителей. При большой проводимости земли влияние токов смещения незначительно (кривые 3, 4 на рис. 2а совпадают). С увеличением частоты сопротивление значительно возрастает за счет электромагнитной (индуктивной) составляющей поля в земле. При малой проводимости земли сопротивление, наоборот, резко падает с увеличением частоты за счет токов смещения (кривые 4, рис. 2б). Кроме того, для больших частот характерно колебательное изменение сопротивления. Аналогичные результаты были получены в [4] для вертикального заземлителя на основе модели антенны, излучающей в диссипативной среде (земле).

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод расчета импульсных характеристик вертикального стержневого заземлителя, основанный на решении уравнений переходного режима операторным методом при приближенном распределении параметров электромагнитного поля.

2. Разработана программа расчета импульсных характеристик и произведена ее апробация применительно к синусоидальным токам различной частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р я б к о в а, Е. Я. Заземление в установках высокого напряжения / Е. Я. Рябкова. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.
2. Б у р г с д о р ф, В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
3. А н н е н к о в, В. З. Протяженные заземлители молниезащиты в грунтах с нелинейными вольт-амперными характеристиками / В. З. Анненков // Электричество. – 2001. – № 7. – С. 22–29.
4. P o l j a k, D. Wire antenna model for transient analysis of simple grounding systems, part I: the vertical grounding electrode / D. Poljak, V. Doric // Progress in Electromagnetic Research. – 2006. – Vol. PIER 64. – P. 149–166.
5. G r e e v, L. D. Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding systems / L. D. Greev, M. Heimbach // IEEE Trans. Power Del. – 1997. – Vol. 12, № 1. – P. 172–178.
6. O l s e n, R. G. A comparison of exact and quasi-static methods for evaluating grounding systems at high frequencies / R. G. Olsen, M. C. Willis // IEEE Trans. Power Del. – 1996. – Vol. 11, № 2. – P. 1071–1081.
7. К а р я к и н, Р. Н. Удар молнии в протяженный неоднородный заземлитель / Р. Н. Карякин, В. Г. Лосев // Электричество. – 2009. – № 4. – С. 12–18.
8. L i u, Y. An engineering model for transient analysis of grounding system under lightning strikes : nonuniform transmission-line approach / Y. Liu, N. Theethayi, R. Thottappillil // IEEE Trans. Power Del. – 2005. – Vol. 20, № 2. – P. 722–730.
9. V e l a z q u e s, R. Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior / R. Velazques, D. Mukhedkar // IEEE Trans. Power Apparatus and System. – 1984. – Vol. PAS-103, № 6. – P. 1314–1322.
10. Э к с п е р и м е н т а л ь н ы е исследования заземлителей молнезащиты при воздействии импульсных токов / Р. К. Борисов [и др.] // Электро. – 2004. – № 1. – С. 13–16.
11. Э л е к т р о м а г н и т н ы е характеристики заземляющих устройств опор высоковольтных линий при измерениях импульсным методом / В. Н. Боронин [и др.] // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – № 2. – С. 11–20.
12. Г е р а с и м о в и ч, Д. А. Расчет электромагнитных характеристик уединенных вертикальных стержневых заземлителей конечной длины при стекании переменного тока промышленной частоты / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 2. – С. 22–29.
13. А н г о, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго; пер. с фр. – М.: Наука, 1965. – 780 с.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 30.05.2011