

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ ПРИ УЧЕТЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров

В статье рассматривается расчет геометрических размеров элементов заземляющих устройств (ЗУ) и их электрические параметры для физического моделирования. На основе расчетов установлены пропорции геометрических размеров и электрических параметров элементов ЗУ по принципу теории подобия и моделирования.

Ключевые слова: заземляющее устройство; вертикальный электрод; горизонтальный электрод; физическое моделирование.

В настоящее время ЗУ являются одним из самых распространенных защитных средств и используются не только для обеспечения электробезопасности, но и при защите от атмосферного электричества, статического электричества, а также, в ряде случаев, для обеспечения электромагнитной совместимости.

Моделирование элементов ЗУ при учете электромагнитных процессов позволяет провести исследование влияния различных факторов на коррозионное состояние ЗУ в лабораторных условиях. При моделировании заземлителей критерии подобия сводятся к условиям геометрического подобия и соблюдению основных критериев подобия электромагнитных процессов [1, 2]:

$$\mu\gamma l^2/t = \text{idem}; \varepsilon/(\gamma t) = \text{idem}, \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость грунта; γ – удельная проводимость грунта; l – длина заземляющих электродов; t – время; ϵ – диэлектрическая проницаемость; $idem$ – соответственно одинаково.

На работу заземлителя весьма существенно влияет нагрев почвы; это особенно заметно при больших значениях тока, когда вокруг заземлителя может оказаться плохо проводящий слой земли. При исследованиях этого явления на модели необходимо, прежде всего, найти критерии подобия теплового процесса. Из основного уравнения стационарного температурного поля имеем:

$$\operatorname{divgrad}\theta = -E^2/(\lambda\rho),$$

где E – электрическая напряженность поля; λ – удельная теплопроводность грунта; ρ – удельное электрическое сопротивление грунта.

При наличии геометрического подобия интегральным аналогом $\operatorname{divgrad}\theta$ является θ/l^2 ; величина E^2 имеет своим интегральным аналогом выражение U^2/l^2 . В этом случае единственный критерий подобия термического процесса:

$$\pi_1 = \rho\lambda\theta/U^2 = idem. \quad (2)$$

В критерии π_1 отсутствует характерный размер l , следовательно, при осуществлении термического подобия можно оперировать заземлителями любых размеров: температура будет пропорциональна квадрату подведенного напряжения. Величина напряжения, которое можно допустить при заданной температуре и данных ρ и λ , легко находится из (2):

$$U = \sqrt{\pi_1} \sqrt{\rho\lambda\theta}. \quad (3)$$

Критерии подобия установившегося теплового режима, происходящего при изменении напряжения подведенного к заземлителю, находим из уравнения:

$$Cd\theta/dt - \operatorname{div}(\lambda\operatorname{grad}\theta) = E^2/\rho, \quad (4)$$

откуда (кроме полученного ранее критерия π_1 , определяющего установившийся режим) получаем критерий, характеризующий скорость изменения теплового поля. Его можно рассматривать как своего рода относительную постоянную времени:

$$\pi_1 = \rho C\theta l^2 / U^2 t,$$

$$\pi_2 = Cl^2 / \lambda t = T_T / t,$$

где $T_T = Cl^2 / \lambda$ – тепловая постоянная времени.

В процессе моделирования можно применить понятие о базисном заземлителе, в качестве которого может быть принят заземлитель в виде квадратного контура со стороной \sqrt{S} , равновеликий по площади S дейст-

вительному заземлителю. Базисный заземлитель выполняется из проводника, диаметром d , равным диаметру действительного проводника, а его ось находится на поверхности земли ($h=0$)[3]. При записи в относительных единицах уравнения для определения сопротивления заземлителя и напряжения прикосновения приобретают вид:

$$f_1 (R/R_0, \rho/\rho_0, l/l_0) = 0;$$

$$f [(U_z - U_x)/(U_z - U_x)_0, I/I_0, \rho/\rho_0, l/l_0] = 0.$$

Для подобия заземлителей необходимо, чтобы соблюдалось постоянство в модели и в натуре относительных величин:

$$\frac{R}{R_0} = \text{idem}; \quad \frac{l}{l_0} = \text{idem}; \quad \frac{\rho}{\rho_0} = \text{idem}; \quad \frac{l}{l_0} = \text{idem},$$

и выполнялся критерий подобия.

В качестве базисного может быть принят линейный размер, характеризующий протяженность заземлителя по горизонтали, а именно длина стороны базисного заземлителя \sqrt{S} .

Геометрическое подобие заземлителей (модели и натуре) полностью определяется постоянством отношений всех линейных размеров к базисному [1, 3]:

$$(d/\sqrt{S}, L/\sqrt{S}; l/\sqrt{S}, hl/\sqrt{S}, h/\sqrt{S}) = \text{idem}. \quad (5)$$

Для исследования влияния факторов окружающей среды и блуждающих токов на коррозионное состояние элементов ЗУ в лабораторных условиях (для физической модели) необходимо выдерживать следующие геометрические размеры и электрические параметры. Длина вертикального электрода L_v , глубина погружения горизонтального электрода t_v , расстояния между электродами в модели a , диаметр вертикального и горизонтального электрода d_v и d_r , количество вертикальных электродов n , суммарная длина вертикальных электродов $L_{\Sigma v}$, площадь заземляющей сетки, сопротивления вертикального и горизонтального электрода R_v и R_r и сопротивления ЗУ R_{Σ} . Все эти размеры и параметры ЗУ зависят от класса напряжения подстанции (ПС), мощности трансформаторов, числа отходящих линий ПС, а также от вида грунта и климатических условий.

Для определения геометрического размера в физической модели используем реальное значение элементов ЗУ (паспортные данные заземлителя). В качестве реального значения принимаем следующие исходные данные [4].

$L_v = 4$ м, – длина вертикального электрода; $t_v = 0,5$ м, – глубина погружения горизонтального электрода; $a = 5$ м, – расстояние между электродами; $d_v = 10$ мм, – диаметр вертикального электрода; $d_r = 50$ мм, – диаметр горизонтального электрода; $n = 40$ шт, – количество вертикальных

электродов; $L_{\Sigma r} = 650$ м, – суммарная длина горизонтальных электродов;
 $S = 2250$ м², – площадь заземляющей сетки.

Определяем сопротивления вертикального и горизонтального электродов:

$$t_0 = \frac{L_B}{2} + t = \frac{4}{2} + 0,5 = 2,5 \text{ м};$$

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi L_B} \left(\ln \frac{2L_B}{0,95 \cdot b} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_0 + L_B}{4t_0 - L_B} \right) = \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 4} \left(\ln \frac{2 \cdot 4}{0,95 \cdot 0,01} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,5 + 4}{4 \cdot 2,5 - 4} \right) =$$

$$= 18,06 \text{ Ом};$$

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi L_r} \ln \frac{L_r^2}{0,5 \cdot b \cdot t} = \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 650} \ln \frac{650^2}{0,5 \cdot 0,05 \cdot 5} = 0,219 \text{ Ом}.$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление грунта (садовая земля), Ом·м. Для удобства экспериментов масштабируем все указанные геометрические размеры и электрические параметры. Для определения вышеуказанных размеров и параметров используем принцип теории подобия и моделирования. Согласно принципу моделирования, пропорция геометрических размеров и электрических параметров элементов ЗУ определяется [1, 3]. Определяем геометрические размеры элементов ЗУ для физической модели.

– длина вертикального электрода:

$$L_B = \frac{L_B}{\sqrt{S}} = \frac{4}{\sqrt{2250}} = 0,084 \text{ м} = 84 \text{ мм};$$

– глубина погружения горизонтального электрода (глубина верхнего конца вертикального электрода):

$$t_B = \frac{t_B}{\sqrt{S}} = \frac{0,5}{\sqrt{2250}} = 0,0105 \text{ м} = 10,5 \text{ мм};$$

– расстояния между электродами в модели:

$$a = \frac{a}{\sqrt{S}} = \frac{5}{\sqrt{2250}} = 0,105 \text{ м} = 105 \text{ мм};$$

– диаметр вертикального электрода:

$$d_B = \frac{d_B}{\sqrt{S}} = \frac{0,01}{\sqrt{2250}} = 0,00021 \text{ м} = 0,21 \text{ мм};$$

– диаметр горизонтального электрода:

$$d_r = \frac{d_r}{\sqrt{S}} = \frac{0,05}{\sqrt{2250}} = 0,00105 \text{ м} = 1,05 \text{ мм};$$

– суммарная длина горизонтальных электродов:

$$L_{\Sigma r} = \frac{L_{\Sigma r}}{\sqrt{S}} = \frac{650}{\sqrt{2250}} = 13,704 \text{ м} = 13\,704 \text{ мм};$$

Определяем сопротивления вертикального и горизонтального электрода для модели.

$$t_0 = \frac{L_B}{2} + t = \frac{0,084}{2} + 0,105 = 0,147 \text{ м};$$

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi L_B} \left(\ln \frac{2L_B}{0,95 \cdot b} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_0 + L_B}{4t_0 - L_B} \right) = \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,084} \left(\ln \frac{2 \cdot 0,84}{0,95 \cdot 0,00021} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 0,147 + 0,0084}{4 \cdot 0,147 - 0,0084} \right) = 1029 \text{ Ом};$$

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho}{2\pi L_{\Gamma}} \ln \frac{L_{\Gamma}^2}{0,5 \cdot b \cdot t} = \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 13,704} \ln \frac{13,704^2}{0,5 \cdot 0,00105 \cdot 0,105} = 10,4 \text{ Ом}.$$

Определяем сопротивление растекания группового заземлителя:

$$R = \frac{R_B \cdot R_{\Gamma}}{R_B \cdot \eta_{\Gamma} + n \cdot R_{\Gamma} \cdot \eta_B}, \quad (6)$$

где η_B, η_{Γ} – коэффициент использования вертикального и горизонтального электрода ($\eta_{\Gamma} = 0,38; \eta_B = 0,64$), n – число электродов [5].

$$R_{3У} = \frac{R_B \cdot R_{\Gamma}}{R_B \cdot \eta_{\Gamma} + n \cdot R_{\Gamma} \cdot \eta_B} = \frac{18,06 \cdot 0,219}{18,06 \cdot 0,38 + 40 \cdot 0,219 \cdot 0,64} = 0,705 \text{ Ом}.$$

Определяем сопротивления растекания группового заземлителя (для модели):

$$R_{3У} = \frac{R_B \cdot R_{\Gamma}}{R_B \cdot \eta_{\Gamma} + n \cdot R_{\Gamma} \cdot \eta_B} = \frac{1029 \cdot 10,4}{1029 \cdot 0,38 + 40 \cdot 10,4 \cdot 0,64} = 16,282 \text{ Ом}.$$

В табл. показаны базисные и подобные геометрические размеры, а также электрические параметры элементов ЗУ для физического моделирования.

Таблица

Базисные и подобные данные элементов ЗУ

№ п/п	Наименование	Геометрические размеры и электрические параметры элементов ЗУ	
		базисные	подобные
1	Длина вертикального электрода	4 м	84 мм
2	Глубина погружения горизонтального электрода	0,5 м	10,5 мм
3	Расстояния между электродами	5 м	105 мм
4	Диаметр вертикального электрода	10 мм	0,21 мм
5	Диаметр горизонтального электрода	50 мм	1,05 мм
6	Количество вертикальных электродов	40 шт.	40 шт.
7	Суммарная длина горизонтальных электродов	650 м	13 704 мм
8	Сопротивления вертикального электрода	18,06 Ом	1029 Ом
9	Сопротивления горизонтального электрода	0,219 Ом	10,4 Ом
10	Сопротивления ЗУ	0,705 Ом	16,282 Ом

На основе полученных данных на кафедре БЖДЮУрГУ была разработана установка (физическая модель) для исследования влияния внешних факторов и блуждающих токов на коррозионное состояние элементов ЗУ [6, 7].

Библиографический список

1. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учеб. пособие / В.А. Веников. – М.: Высшая школа. 1976. – 479 с.
2. Байдин, Г.В. Математическое моделирование электрических полей в электрофизических установках / Г.В. Байдин, В.Ф. Куропатенко, И.В. Лупанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2013. – Т. 6. – № 3. – С. 18–24.
3. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учеб. пособие для вузов / В.А. Веников, Г.В. Веников. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.
4. Долин, П.А. Электробезопасность. Теория и практика: учебное пособие для вузов / П.А. Долин, В.Т. Медведев, В.В. Корочков, А.Ф. Монахов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 280 с.
5. Григорьев, Д.Н. Коэффициент использования комбинированного заземлителя / Д.Н. Григорьев // Промышленная энергетика. – 2002. – № 10. – С. 45–50.
6. Абдуллоев, Р.Т. Моделирование заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев // Энергетика в современном мире: VI Международная заочная научно-практическая конференция 2–6 декабря 2013 г.: сборник статей / Забайкальский гос. ун-т. – Чита: ЗабГУ, 2013. – С. 30–33.
7. Абдуллоев, Р.Т. Стенд для исследования заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.Б. Тряпицын // Материалы LIII международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. д-ра техн. наук П.Г. Свечникова. – Челябинск: ЧГАА, 2014. – Ч. IV. – С. 98–102.

[К содержанию](#)