

РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА

Заземляющие устройства (ЗУ) играют важную роль в бесперебойной работе электрических станций, подстанций, воздушных и кабельных линий, других объектов электроэнергетики и промышленности. Сопротивление растеканию тока – главный параметр ЗУ, который должен рассчитываться с погрешностью не более 5% по стандарту [1]. Это требование легко выполнить на промышленной частоте, но на частотах до единиц МГц, возникающих в задачах электромагнитной совместимости при воздействии тока молнии или высокочастотной составляющей тока КЗ, погрешности будут десятки процентов. С подобной погрешностью определяются и перенапряжения, помехи и другие параметры, связанные с процессами растекания тока в земле. Причина – удельное сопротивление земли ρ существенным образом зависит от частоты, особенно в грунтах с плохой проводимостью, характерной для значительной части территории нашей страны. Этот фактор не учитывается в настоящее время не только в нормативных документах по проектированию ЗУ, но и работах российских исследователей.

Описать состояние вопроса и оценить влияние частотной зависимости параметров грунта на сопротивление молниезащитного заземления – цель настоящей работы.

Электропроводность грунта определяют электролиты, которые образованы водой с добавками солей и кислот. Зависимость электропроводности $\zeta=1/\rho$ и диэлектрической проницаемости ϵ электролитов от частоты протекающего тока была открыта П. Дебаем и Х. Фалькенхагеном в 1928 г. и уточнена К.С. Cole и Р.Н. Cole в 1941 г. К сожалению, эти модели не нашли практического применения из-за трудностей подбора параметров для конкретного грунта.

Дальнейшие исследования были направлены на экспериментальное получение зависимостей удельной проводимости $\zeta(f)$ и диэлектрической проницаемости $\epsilon(f)$, пригодных для расчета заземлителей. Подробный анализ этих исследований дан в [2], результаты представлены в табл. 1.

Анализ частотных моделей показывает (рис.1), что удельное сопротивление грунта, а следовательно и сопротивление ЗУ на частоте 1 МГц может быть вдвое меньше, чем на низких частотах. Этот эффект несомненно нужно учитывать при проектировании молниезащитного и помехозащитного заземления.

Методы расчета ЗУ при импульсных воздействиях. Наиболее часто используется частотный метод (ЧМ) или метод дискретных схем (МДС) для расчетов во временной области [3]. В задачах с частотной зависимостью параметров грунта преимущества ЧМ выглядят очевидными. Действительно, вместо постоянного для всех гармоник удельного сопротивления грунта теперь подставляем значения (табл. 1), т.е. изменения в компьютерной программе минимальны. Однако проблемы возникают с удовлетворением принципа причинности [4], проявлением которого является равенство нулю напряжения ЗУ при нулевом токе в начальный момент времени (и при $t < 0$). При численных расчетах он нарушается.

Известно, что импульсная функция раскладывается в ряд Фурье во всем диапазоне частот. Ограничение числа членов ряда ведет к погрешности, что и приводит к нарушению принципа причинности, т.е. $u(0) < 0$ при $i(0) = 0$. Переход к частотно-зависимым параметрам грунта, полученным экспериментально в ограниченном диапазоне частот, без учета асимптотического поведения функции, приводит к увеличению погрешности и еще большему нарушению принципу причинности. Увеличение числа членов ряда Фурье не решает проблемы. Существующие математические подходы к решению проблемы причинности не снимают ее полностью, но существенно усложняют численный алгоритм. В подобных условиях преимущество имеет метод дискретных схем, где проблема причинности не возникает, с учетом разработанной в [3] методике учета частотных параметров во временной области.

Пример. Рассчитаем входное напряжение заземлителя молниеотвода (рис. 2) при первом и втором импульсе тока молнии без учета и с учетом частотной зависимости параметров грунта.

Модели частотно-зависимых параметров грунта.

Авторы модели	Выражения	Частотный диапазон
1 Scott	$\varepsilon(f) = 10^D,$ $D = 5.491 + 0.946 \cdot \log_{10}(\sigma_{100\Gamma\text{ч}}) - 1.097 \cdot \log_{10}(f) + 0.069 \cdot \log_{10}^2(\sigma_{100\Gamma\text{ч}}) -$ $- 0.114 \cdot \log_{10}(f) \cdot \log_{10}(\sigma_{100\Gamma\text{ч}}) + 0.067 \cdot \log_{10}^2(f)$ $\sigma(f) = 10^K,$ $K = 0.028 + 1.098 \cdot \log_{10}(\sigma_{100\Gamma\text{ч}}) - 0.068 \cdot \log_{10}(f) + 0.036 \cdot \log_{10}^2(\sigma_{100\Gamma\text{ч}}) -$ $- 0.046 \cdot \log_{10}(f) \cdot \log_{10}(\sigma_{100\Gamma\text{ч}}) + 0.018 \cdot \log_{10}^2(f)$	100 Гц – 1 МГц
2 Smith-Longmire	$\varepsilon(f) = \varepsilon_{\infty} + \sum_{i=1}^{13} \frac{a_i}{1 + \left(\frac{f}{F_i}\right)^2},$ $\sigma(f) = \sigma_{DC} + 2\pi\varepsilon_0 \sum_{i=1}^{13} a_i \cdot F_i \cdot \frac{\left(\frac{f}{F_i}\right)^2}{1 + \left(\frac{f}{F_i}\right)^2}$	100 Гц – 200 МГц
3 Messier	$\varepsilon(f) = \frac{\varepsilon_{\infty}}{\varepsilon_0} \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_{DC}}{\pi \cdot f \cdot \varepsilon_{\infty}}}\right),$ $\sigma(f) = \sigma_{DC} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{4\pi \cdot f \cdot \varepsilon_{\infty}}{\sigma_{DC}}}\right)$	100 Гц – 1 МГц
4 Visacro-Portela	$\varepsilon(f) = 2.34 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{1}{\sigma_{100\Gamma\text{ч}}}\right)^{-0.535} \cdot f^{-0.597},$ $\sigma(f) = \sigma_{100\Gamma\text{ч}} \cdot \left(\frac{f}{100}\right)^{0.072}$	40 Гц – 2 МГц
5 Portela	$\sigma(f) \pm j\omega\varepsilon(f) = \sigma_{100\Gamma\text{ч}} + \Delta_i \cdot \left[\cot\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right) \pm j\right] \cdot \left(\frac{\omega}{2\pi \cdot 10^6}\right)^{\alpha}$	100 Гц – 2 МГц
6 Visacro-Alipio	$\varepsilon(f) = 7.6 \cdot 10^3 \cdot f^{-0.4} + 1.3$ $\sigma(f) = \sigma_{100\Gamma\text{ч}} \cdot \left[1 + \left(1.2 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_{100\Gamma\text{ч}}}\right)^{0.73}\right) \cdot (f-100)^{0.65}\right]$	100 Гц – 4 МГц

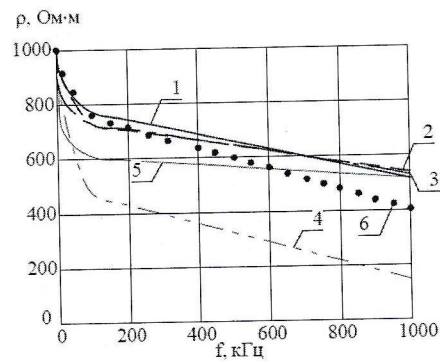


Рис.1. – Зависимость удельного сопротивления грунта от частоты f тока по модели: 1 – Messier, 2 – Scott, 3 – Smith Longmire, 4 – Portela, 5 – Visacro-Portela, 6 – Visacro-Alipio

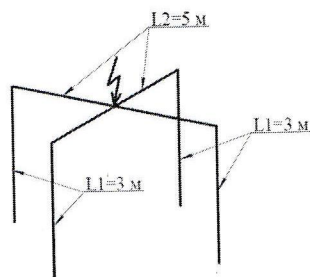


Рис.2. – Заземлитель на глубине 0,5 м, радиус поперечного сечения стержней 10 мм

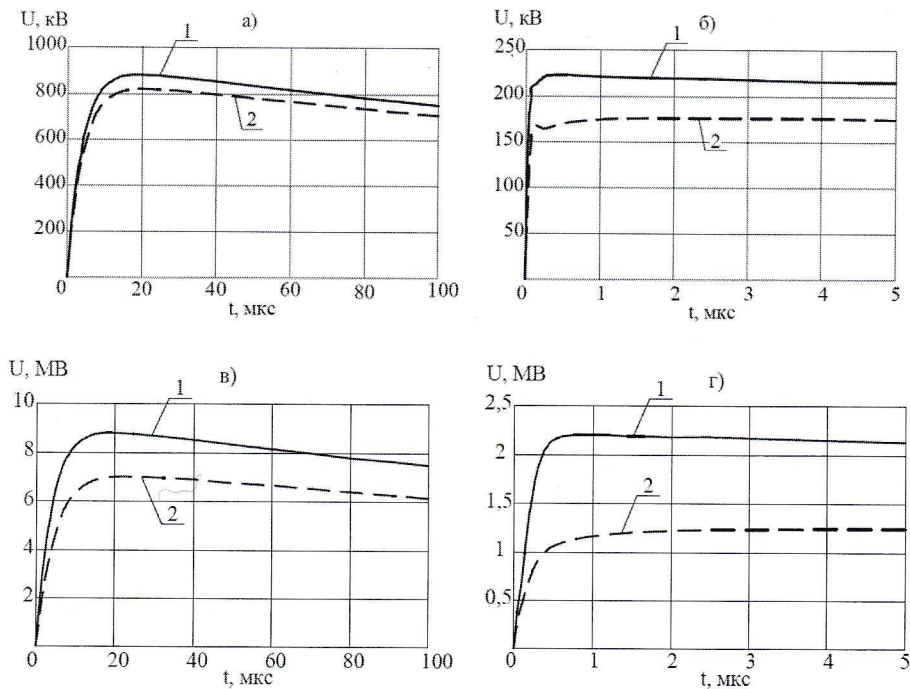


Рис.3. – Потенциал заземлителя (рис.2) в грунте с $\rho_0=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (графики а, б), $\rho_0=1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (графики в, г) при вводе импульса тока 100 кА, 10/350 мкс (графики а, в) и 25 кА, 0,25/100 мкс (графики б, г). 1 – $\epsilon r=10$, $\rho=\rho_0=\text{const}$; 2 – $\epsilon(f)$, $\rho(f)$ по модели Messier

Выводы. Учет частотной зависимости $\rho(f)$, $\epsilon(f)$ позволяет повысить адекватность расчета ЗУ в задачах молниезащиты и ЭМС. Влияние частотной зависимости параметров грунта $\rho(f)$ и $\epsilon(f)$ на сопротивление ЗУ тем сильнее, чем выше удельное сопротивление грунта и частота. В задачах молниезащиты зависимости $\rho(f)$ и $\epsilon(f)$ следует учитывать для грунта с низкой проводимостью ($\rho_0 > 500\text{--}1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) при первом импульсе тока молнии и для грунта ($\rho_0 > 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) при втором импульсе тока молнии.

Литература

1. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ. СТО 56947007-29.130.15.114–2012.
2. D. Savka, N. Mora, F. Rachidi, « A comparison of frequency-dependent soil models: application to the analysis of grounding systems», IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 56 (1), vol. 56, no.2, pp. 177–187, feb. 2014.
3. Шишигин С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств. Электричество. – 2010. – № 1.
4. Мэтьюз, Дж. Математические методы физики / Дж. Мэтьюз, Р. Уокер. – Москва: Атомиздат, 1972 – 397 с.