

УДК 621.3.013

А.А. Кустов (5 курс, каф. ЭСиАЭС), Р.П. Кияткин, к.т.н., доц.

РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В мощных электроэнергетических установках при коротких замыканиях на землю какой-либо точки электрической цепи, которая нормально не должна иметь соединения с землей, возникают большие токи короткого замыкания, проходящие через *заземляющее устройство*, землю и место повреждения электрической цепи. Заземляющее устройство состоит из *заземляющих проводников*, соединяющих заземляемые части установки с заземлителем, и *заземлителя* – одной или группы металлических труб (полос или уголков), находящихся в непосредственном соприкосновении с землей (обычно на глубине 0,5–0,7 м). Падение напряжения в земле около заземлителя зависит от величины тока короткого замыкания и от *сопротивления заземления* – сопротивления земли, которое встречает ток при растекании от заземлителя.

При конструировании заземлителей стремятся уменьшить сопротивление заземления, чтобы падение напряжения, возникающее на поверхности земли на длине человеческого шага (*шаговое напряжение* $U_{ш}$), нигде не превышало величины, при которой через идущего по земле человека могли бы пройти опасные для его жизни токи [1]. Уменьшают сопротивления заземления, увеличивая размеры и усложняя конструкции заземлителей, а также увеличивая удельную проводимость почвы. Точный *расчет заземлителей*, состоящий в определении сопротивления заземления и потенциала электрического поля в произвольной точке проводящей среды (земли), при сложных конфигурациях заземлителей практически невозможен. Поэтому особое значение приобретают инженерные методики оценочных расчетов характеристик заземлителей. Ниже рассматривается методика приближенного расчета сложного заземлителя, элементы которого выполнены, например, из некондиционных водопроводных или газовых труб.

Трудность, связанную с неоднородностью среды «воздух-земля», обходим с использованием *метода зеркальных изображений* [2], зеркально отражая проложенные в земле элементы заземлителя в пространство над поверхностью земли и заменяя воздух проводящей средой (землей). Очевидно, сопротивление заземления R в исходной задаче в два раза больше сопротивления R' растеканию тока от системы, составленной из заземлителя-оригинала и параллельно «включенного» с ним заземлителя-изображения.

Для расчета сопротивления R' используем *метод электростатической аналогии* [2]. Согласно этому методу отношение электрической проводимости некоторой системы

проводников (заземлителя) $G' = \frac{1}{R'}$ к ее емкости C' в соответствующей электростатической задаче равно отношению удельной проводимости γ_3 среды, окружающей заземлитель, (земли) к диэлектрической проницаемости ε внешней среды в электростатической задаче:

$$\frac{G'}{C'} = \frac{\gamma_3}{\varepsilon},$$

откуда следует

$$R' = \frac{1}{G'} = \frac{1}{C'} \cdot \frac{\varepsilon}{\gamma_3}.$$

В свою очередь емкость C' системы, состоящей из протяженных проводников конечной длины, может быть рассчитана приближенным *методом средних потенциалов* [2].

Согласно этому методу предполагаем, что суммарный заряд системы q' распределен равномерно вдоль ее проводников с линейной плотностью

$$\tau = \frac{q'}{l'},$$

где $l'=2l$, а l – суммарная длина элементов действительной (без отражения) системы. При численной реализации метода разбиваем l на n элементарных отрезков, длины которых l_k ($k=1, \dots, n$). Рассматривая полученные отрезки проводников как систему n заряженных тел с зарядами $q_k=\tau l_k$ ($k=1, \dots, n$), для потенциала k -го тела (отрезка) можем записать выражение

$$U_k = \alpha_{kk} q_k + \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^n \alpha_{kp} q_p + \sum_{p=1}^n \alpha'_{kp} q_p,$$

где α_{kk} – собственный потенциальный коэффициент цилиндрического отрезка длиной l_k и радиуса r_k , равный [2]

$$\alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon l_k} \cdot \left[\ln \left(\frac{l_k}{r_k} + \sqrt{\frac{l_k^2}{r_k^2} + 1} \right) - \sqrt{\frac{r_k^2}{l_k^2} + 1} + \frac{r_k}{l_k} \right];$$

α_{kp} – взаимный потенциальный коэффициент k -го и p -го отрезков, равный приближенно

$$\alpha_{kp} \cong \frac{1}{4\pi\epsilon r_{kp}};$$

α'_{kp} – взаимный потенциальный коэффициент k -го и зеркального изображения p -го отрезков, равный

$$\alpha'_{kp} \cong \frac{1}{4\pi\epsilon r'_{kp}}.$$

В последних формулах расстояния r_{kp} и r'_{kp} вычисляются между серединами соответствующих отрезков.

Среднее значение потенциала системы $U_{\text{ср}}$ получаем усреднением значений U_k вдоль всех проводников системы:

$$U_{\text{ср}} = \frac{\sum_{k=1}^n U_k l_k}{l}.$$

Искомая емкость системы, образованной действительной (исходной) системой проводников и ее зеркальным изображением, определяется соотношением

$$C' = \frac{q'}{U_{\text{ср}}}.$$

Потенциал в произвольной точке M приближенно вычисляется по формуле

$$U_M \cong \frac{1}{4\pi\varepsilon} \sum_{k=1}^n q_k \left(\frac{1}{r_{kM}} + \frac{1}{r'_{kM}} \right),$$

где r_{kM} – расстояние от точки M до середины k -го отрезка; r'_{kM} – то же до середины зеркального изображения k -го отрезка. Шаговое напряжение $U_{ш}$ в интересующей области определяется разностью потенциалов в точках, отстоящих друг от друга на длину шага человека (0,8 м [1]).

Изложенный алгоритм расчета заземлителей из трубчатых элементов реализован в компьютерной программе *ground_U.for.*, результаты расчетов по которой вполне удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными, полученными физическим моделированием в лаборатории электромагнитного поля (ЭМП) кафедры ТОЭ СПбГПУ. После создания соответствующей программы в системе Mathcad предполагается более широкое использование изложенной методики и новой компьютерной программы в лаборатории ЭМП при выполнении расчетной части модернизированной работы № 21 “Исследование пространственного растекания электрического тока в проводящей среде и сопротивления заземлений” [3].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Новиков П.А., Халилов Ф.Х. Методические указания и правила электробезопасности при работах с источниками различных частот и напряжений. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1980. – 81 с.
2. Новгородцев А.Б. ТОЭ₂: Теория электромагнитного поля. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 248 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С., Юринов В.М. Руководство к лаборатории электромагнитного поля. – М.: Высшая школа, 1966. – 267 с.