

УДК 620.9

А.В.Коротков (3 курс, каф. ЭСиС), Р.П.Кияткин, к.т.н., доц.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОД ПРОВОДАМИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛЭП

Существующее вблизи проводов высоковольтных линий электропередачи электромагнитное поле неблагоприятно действует на организм человека. Влияние сильных электромагнитных полей (изменяющихся с промышленной частотой 50 Гц) на человека пока мало изучено. Проведенные в нашей стране и за рубежом исследования показали, что сильное электромагнитное поле вызывает функциональное нарушение сердечно-сосудистой системы и нарушение невралгического характера. Вредные воздействия на человека сильных полей были замечены при вводе в эксплуатацию высоковольтных подстанций и воздушных ЛЭП напряжением 400, 500 и 750 кВ [1].

При промышленной частоте 50 Гц электрическую и магнитную составляющие электромагнитного поля можно рассматривать отдельно. Поэтому и с точки зрения воздействия на человека составляющие электромагнитного поля изучаются отдельно. Установлено, что количество поглощаемой живым организмом энергии для магнитной составляющей примерно в 50 раз меньше, чем для электрической. А измерения на мощных промышленных установках напряжением 500...750 кВ показали, что напряженность магнитного поля в местах нахождения обслуживающего персонала не превышает 20...25 А/м, в то время как вредное действие магнитного поля на живой организм проявляется при напряженностях 150...200 А/м. Поэтому при разработке мероприятий по защите персонала от влияния электромагнитного поля промышленной частоты учитывают только его электрическую составляющую [2].

Вредные последствия пребывания человека в сильном электрическом поле зависят от напряженности E и продолжительности его воздействия. Чем выше напряженность поля, тем меньшая допускается продолжительность пребывания в нем человека. Таким образом, вопросы измерения, расчета и оценки максимальной напряженности электрического поля под проводами высоковольтных ЛЭП являются жизненно важными.

В работе предложен и реализован алгоритм решения задачи расчета поля трех проводов, параллельных заземленной поверхности. Применением метода зеркальных изображений задача сведена к рассмотрению полей исходных проводов с погонными зарядами τ_k ($k=1,2,3$) и их зеркальных изображений $\tau'_k = -\tau_k$. Если при рассмотрении поперечного сечения системы проводов на комплексной плоскости z ($z = x + jy$, ось x совмещена с поверхностью земли) оси исходных проводов имеют комплексные координаты $z_k = x_k + jy_k$, то координаты зарядов-изображений будут $\hat{z}_k = x_k - jy_k$.

Если электрическое поле системы исходных зарядов и зарядов-изображений описать с помощью комплексного потенциала [3]:

$$W(z) = -j \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^3 \left[\tau_k \ln(z - z_k) + \tau'_k \ln(z - \hat{z}_k) \right],$$

то его напряженность можно найти как модуль комплексной напряженности:

$$E(z) = \left| \frac{dW(z)}{dz} \right| = \left| -j \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^3 \left[\frac{\tau_k}{z - z_k} + \frac{\tau'_k}{z - \hat{z}_k} \right] \right|. \quad (1)$$

Последние формулы строго описывают поле лишь при условии, что провода с погонными зарядами τ_k имеют бесконечно малое поперечное сечение. Но с их помощью можно получить достаточно точные результаты и тогда, когда конечные поперечные размеры

проводов (их радиусы R_k) существенно меньше расстояний между проводами d_{kp} и высот их подвесов h_k . В высоковольтных ЛЭП радиусы проводов имеют порядок сантиметров, а расстояния между проводами и высоты их подвеса измеряются метрами, следовательно, условие $R_k \ll d_{kp}, h_k$ выполняется. Однако для расчета поля ЛЭП эти формулы непосредственно применить нельзя, так как для проводов, подключенных к источникам ЭДС, известны, как правило, напряжения между проводами, а не заряды отдельных проводов. Таким образом, предварительно необходимо решить самостоятельную задачу определения зарядов проводов по заданным напряжениям. Предложен следующий алгоритм решения этой задачи.

Пусть напряжения между проводами представляют собой симметричную трехфазную систему напряжений. Линейные напряжения u_{kp} выражаются через фазные напряжения u_k следующим образом

$$u_{kp} = u_k - u_p. \quad (2)$$

Фазные напряжения и заряды проводов $q_k = \tau_k l$ (l – длина рассматриваемого участка линии, например, 1 м) связаны линейными алгебраическими соотношениями

$$u_p = \sum_{k=1}^3 \alpha_{pk} q_k, \quad (3)$$

где α_{pk} – потенциальные коэффициенты, которые в силу квазистационарности переменного электромагнитного поля ЛЭП можно рассчитывать по тем же формулам, что и в электростатике:

$$\alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{|z_k - \hat{z}_k|}{R_k}; \quad \alpha_{pk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{|z_p - \hat{z}_k|}{|z_p - z_k|}, \quad (k \neq p).$$

Положим, что в любой момент времени выполняется условие уравновешенности:

$$q_1 + q_2 + q_3 = 0. \quad (4)$$

Очевидно, наиболее опасным местом под ЛЭП с точки зрения воздействия поля на персонал является пространство под тем проводом, который подвешен ниже других. Предположим, что это провод фазы 2. Максимуму мгновенного значения фазного напряжения u_2 соответствуют следующие мгновенные значения линейных напряжений: $u_{31} = 0$, $u_{23} = \sqrt{2}U_{\text{л}} \sin 120^\circ$ и $u_{12} = \sqrt{2}U_{\text{л}} \sin(-120^\circ)$, где $U_{\text{л}}$ – действующее значение линейного напряжения. Тогда из соотношения (2) следует равенство фазных напряжений $u_1 = u_3$, а на основании выражений (2)-(4) может быть сформулирована система линейных алгебраических уравнений относительно зарядов проводов 1-ой и 2-ой фаз и соответствующих фазных напряжений:

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11} - \alpha_{13} & \alpha_{12} - \alpha_{13} & -1 & 0 \\ \alpha_{21} - \alpha_{23} & \alpha_{22} - \alpha_{23} & 0 & -1 \\ \alpha_{31} - \alpha_{33} & \alpha_{32} - \alpha_{33} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{23} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

После решения системы уравнений (5) подсчитываются погонные заряды всех фаз: $\tau_1 = q_1/l$, $\tau_2 = q_2/l$ и $\tau_3 = -\tau_1 - \tau_2$. Затем применяется формула (1) для расчета напряженности электрического поля под проводом 2 на уровне головы человека, то есть в точке с комплексной координатой $z_r = x_2 + jh_r$, где $h_r = 1,8$ м.

Изложенный алгоритм был, в частности, апробирован при расчете максимальной напряженности электрического поля под проводами ЛЭП-110 с геометрическими характеристиками $R_1 = R_2 = R_3 = 0,6$ см, $h_1 = h_2 = h_3 = 6$ м, $d_{12} = d_{23} = 4$ м и $d_{13} = 8$ м. Полученные результаты: линейные напряжения $u_{31} = 0$, $u_{23} = -u_{12} = 134,722$ кВ, фазные напряжения $u_1 = u_3 = -42,221$ кВ, $u_2 = 92,501$ кВ, погонные заряды на проводах $\tau_1 = \tau_3 = -3,988 \cdot 10^{-7}$ Кл/м,

$\tau_2=7,9975 \cdot 10^{-7}$ Кл/м и напряженность электрического поля в области головы человека, находящегося под вторым проводом, $E_{\max}=E(z_r)=2,007$ кВ/м.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Веников В.А., Пуятин Е.В. Введение в специальность: Электроэнергетика. – М.: Высшая школа, 1986. – 239 с.
2. 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.
3. Новгородцев А.Б. ТОЭ₂: Теория электромагнитного поля. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 1997. – 183 с.