

математической модели с помощью программно-вычислительного комплекса // Техническая электродинамика. - Киев, 1991. - № 1. - С.

4. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем, - Львов: Вища школа, 1986. -164 с.

ГИУА

10.04.1998

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LI, № 2, 1998, с. 195-202.

УДК 621.315.2

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А.А. КАРАПЕТЯН, Ж.М. МИРЗАБЕКЯН

## РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАБЕЛЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ЖИЛАМИ БЕЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Сարգարժան են առանց մետաղաէտան պատիւանի զուգահեռ փոխած ջղերով եռաֆազ կաբէլի էլեկտրական լարվածութեան որոշման մեթոտի ու տեսաթոտուը և համեմատումը ոլորված և մետաղական պատյանում տեղադրված երեք ջղերի հետ: Մեթոտը հնարավորութեան է առաջի որոշելու մեկուսացված ֆազերի լարվածութեան կախումը նրանց միեկ եղանակով որոշումից:

Излагаются теория и метод определения напряженности электрического поля параллельно расположенных жил трехфазного кабеля без металлической оболочки. Проводится их сравнение с тремя скрученными и расположенными в металлической оболочке жилами. Метод дает возможность определить зависимость напряженности изолированных фаз от расстояния между ними.

Ил.4. Библиогр.: 3 назв.

The theory and method of definition for electrical field intensity in three-phase cable with parallel located phases and without a metallic jacket is proposed. The method gives an opportunity to define the dependence of isolated phase intensity on the distance between them.

Ил. 4. Ref. 3.

В кабелях с металлической оболочкой часто происходят межфазовые короткие замыкания, приводящие к прекращению энергоснабжения. Причиной коротких замыканий являются также блуждающие токи, которые создают цепь с металлической оболочкой и со временем разрушают ее. Учитывая, что себестоимость металлических оболочек, особенно свинцовой, очень высокая, создается настоятельная потребность для нахождения такого типа и такого расположения фаз кабелей, который будет свободен от вышеперечисленных недостатков.

Целью настоящей работы является разработка метода определения напряженности электрического поля параллельно расположенных жил трехфазного кабеля без металлической оболочки. Показаны параллельно расположенные три отдельно изолированные жилы (рис.1), которые находятся друг от друга на

определенном расстоянии ( $R$ ). Изоляция кабелей имеет диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_2$ , а диэлектрическая проницаемость окружающего пространства -  $\epsilon_1$ .

Принимается, что в изолированных жилах заряд распределен равномерно по сечениям  $D_1, D_2, D_3$ . Тогда потенциал поля в точке  $Q$  будем искать в следующем виде [1].

Точка отсчета ( $M$ ) находится на границе  $G_1$ .

$$\begin{aligned}
 U(Q) = & q \frac{1}{2\pi\epsilon} \iint_{D_1} \ln \frac{1}{r_{QM}} dS_M + \oint_{G_1} \sigma_1(M) \ln \frac{1}{r_{QM}} dl_M - \\
 & - \frac{q}{2} \frac{1}{2\pi\epsilon} \iint_{D_2} \ln \frac{1}{r_{QM}} dS_M + \oint_{G_2} \sigma_2(M) \ln \frac{1}{r_{QM}} dl_M - \\
 & - \frac{q}{2} \frac{1}{2\pi\epsilon} \iint_{D_3} \ln \frac{1}{r_{QM}} dS_M + \oint_{G_3} \sigma_3(M) \ln \frac{1}{r_{QM}} dl_M,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma_k(M)$  - поверхностная плотность зарядов на  $G_k$  ( $k = 1, 2, 3$ );  $q$  - величина заряда на единице длины провода.

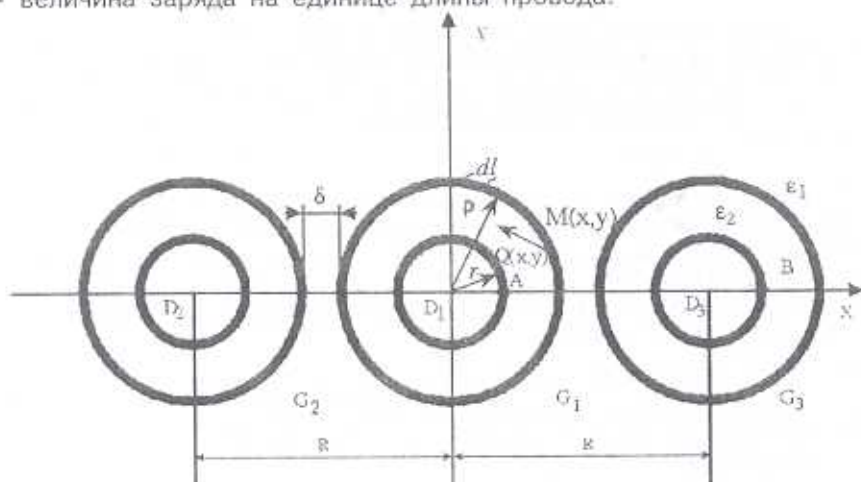


Рис.1. К расчету электрического поля трехфазного кабеля переменного тока с параллельно расположенными фазами

Примем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 \sigma_1(\alpha) &= \sigma_1(M)\rho = \sigma_1(\rho \cos \alpha, \rho \sin \alpha)\rho, \\
 \sigma_2(\beta) &= \sigma_2(M)\rho = \sigma_2(-R + \rho \cos \beta, \rho \sin \beta)\rho, \\
 \sigma_3(\gamma) &= \sigma_3(M)\rho = \sigma_3(R + \rho \cos \gamma, \rho \sin \gamma)\rho.
 \end{aligned} \quad (2)$$

Поскольку металлическая оболочка отсутствует, то отражение с поверхности оболочки равно нулю ( $E_1=0$ ). Так как фазы кабелей расположены параллельно, то надо определить потенциал плоскопараллельного поля  $U(Q)$  в точке  $Q(x,y)$ .

Тогда потенциал  $U(Q)$  в точке  $Q(x, y)$  запишется в виде

$$\begin{aligned}
 U(x, y) = & \frac{q}{2\pi\epsilon} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\rho} \ln \frac{1}{\sqrt{(a\cos\psi - x)^2 + (a\sin\psi - y)^2}} a da - \\
 & - \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{q}{2} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\rho} \left( \ln \frac{1}{\sqrt{(R + a\cos\psi - x)^2 + (a\sin\psi - y)^2}} + \right. \\
 & \left. + \ln \frac{1}{\sqrt{(-R + a\cos\psi - x)^2 + (a\sin\psi - y)^2}} \right) a da + \\
 & + \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_1(\alpha) \ln \frac{1}{\sqrt{(\rho\cos\alpha - x)^2 + (\rho\sin\alpha - y)^2}} d\alpha + \\
 & + \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_2(\beta) \ln \frac{1}{\sqrt{(-R + \rho\cos\beta - x)^2 + (\rho\sin\beta - y)^2}} d\beta + \\
 & + \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_3(\gamma) \ln \frac{1}{\sqrt{(R + \rho\cos\gamma - x)^2 + (\rho\sin\gamma - y)^2}} d\gamma.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Поскольку напряженность поля  $E(x, y)$  равна  
 $E(x, y) = -\text{grad}U(x, y)$ ,

то, продифференцировав (3) по  $x$  и  $y$ , получим

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial U}{\partial x} = & \frac{q}{2\pi\epsilon} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\rho} \frac{a\cos\psi - x}{\sqrt{(a\cos\psi - x)^2 + (a\sin\psi - y)^2}} a da - \\
 & - \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{q}{2} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\rho} \left( \frac{R + a\cos\psi - x}{(R + a\cos\psi - x)^2 + (a\sin\psi - y)^2} + \right. \\
 & \left. + \frac{-R + a\cos\psi - x}{(-R + a\cos\psi - x)^2 + (a\sin\psi - y)^2} \right) a da + \\
 & + \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_1(\alpha) \ln \frac{\rho\cos\alpha - x}{\sqrt{(\rho\cos\alpha - x)^2 + (\rho\sin\alpha - y)^2}} d\alpha + \\
 & + \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_2(\beta) \ln \frac{-R + \rho\cos\beta - x}{\sqrt{(-R + \rho\cos\beta - x)^2 + (\rho\sin\beta - y)^2}} d\beta + \\
 & + \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_3(\gamma) \ln \frac{R + \rho\cos\gamma - x}{\sqrt{(R + \rho\cos\gamma - x)^2 + (\rho\sin\gamma - y)^2}} d\gamma,
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial U}{\partial y} = & \frac{q}{2\pi\epsilon} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\rho} \frac{a \sin \psi - y}{\sqrt{(a \cos \psi - x)^2 + (a \sin \psi - y)^2}} da - \\
& - \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{q}{2} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\rho} \left( \frac{\frac{a \sin \psi - y}{\sqrt{(R + a \cos \psi - x)^2 + (a \sin \psi - y)^2}} +}{+ \frac{a \sin \psi - y}{\sqrt{(-R + a \cos \psi - x)^2 + (a \sin \psi - y)^2}}} \right) da + \\
& + \int_0^{2\pi} \bar{\sigma}_1(\alpha) \frac{\rho \sin \alpha - y}{\sqrt{(\rho \cos \alpha - x)^2 + (\rho \sin \alpha - y)^2}} d\alpha + \int_0^{2\pi} \bar{\sigma}_2(\beta) \times \\
& \times \frac{\rho \sin \beta - y}{\sqrt{(-R + \rho \cos \beta - x)^2 + (\rho \sin \beta - y)^2}} d\beta + \\
& + \int_0^{2\pi} \bar{\sigma}_3(\gamma) \frac{\rho \sin \gamma - y}{\sqrt{(R + \cos \gamma - x)^2 + (\rho \sin \gamma - y)^2}} d\gamma.
\end{aligned} \tag{5}$$

Примем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
-F_1(x, y) = & q \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\rho} \frac{a \cos \psi - x}{\sqrt{(a \cos \psi - x)^2 + (a \sin \psi - y)^2}} da - \\
& - \frac{q}{2} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\rho} \left( \frac{\frac{R + a \cos \psi - x}{\sqrt{(R + a \cos \psi - x)^2 + (a \sin \psi - y)^2}} +}{+ \frac{-R + a \cos \psi - x}{\sqrt{(-R + a \cos \psi - x)^2 + (a \sin \psi - y)^2}}} \right) da,
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
-F_2(x, y) = & \frac{q}{2\pi\epsilon} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\rho} \frac{a \sin \psi - y}{\sqrt{(a \cos \psi - x)^2 + (a \sin \psi - y)^2}} da - \\
& - \frac{1}{2\pi\epsilon} \frac{q}{2} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\rho} \left( \frac{\frac{a \sin \psi - y}{\sqrt{(R + a \cos \psi - x)^2 + (a \sin \psi - y)^2}} +}{+ \frac{a \sin \psi - y}{\sqrt{(-R + a \cos \psi - x)^2 + (a \sin \psi - y)^2}}} \right) da.
\end{aligned} \tag{7}$$

На границах  $G_k$  ( $k=1,2,3$ ) имеем условия:  $\epsilon_1(\bar{E}, \bar{n})_c = \epsilon_2(\bar{E}, \bar{n})_c$ , где  $\bar{E}$  - значение напряженности поля на кривой  $G_k$ . Из этих условий на границе  $G_k$  получим следующее уравнение в точке  $Q = (\rho \cos \psi, \sin \psi)$  при  $\epsilon_1 = 1$ ,  $\epsilon_2 = 2,2$ :

$$\begin{aligned}
& \left( \varepsilon_1 \left[ F_1(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi)(-\cos \varphi) + F_2(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi)(-\sin \varphi) + \right. \right. \\
& + \frac{1}{2\rho} \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_1(\alpha) d(\alpha) - \frac{\pi}{\rho} \tilde{\sigma}_1(\varphi) - \\
& - \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_2(\beta) \frac{R \cos \varphi + \rho - \rho \cos(\beta - \varphi)}{R^2 + 2\rho R(\cos \beta - \cos \varphi) + 4\rho^2 \sin^2 \frac{\beta - \varphi}{2}} d\beta - \\
& \left. - \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_3(\gamma) \frac{-R \cos \varphi + \rho - \rho \cos(\gamma - \varphi)}{R^2 - 2\rho R(\cos \beta - \cos \varphi) + 4\rho^2 \sin^2 \frac{\beta - \varphi}{2}} d\gamma \right] = \\
& = \varepsilon_2 \left[ F_1(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi)(-\cos \varphi) + F_2(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi)(-\sin \varphi) + \right. \\
& + \frac{1}{2\rho} \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_1(\alpha) d(\alpha) + \frac{\pi}{\rho} \tilde{\sigma}_1(\varphi) - \\
& - \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_2(\beta) \frac{R \cos \varphi + \rho - \rho \cos(\beta - \varphi)}{R^2 + 2\rho R(\cos \beta - \cos \varphi) + 4\rho^2 \sin^2 \frac{\beta - \varphi}{2}} d\beta - \\
& \left. - \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_3(\gamma) \frac{-R \cos \varphi + \rho - \rho \cos(\gamma - \varphi)}{R^2 - 2\rho R(\cos \beta - \cos \varphi) + 4\rho^2 \sin^2 \frac{\beta - \varphi}{2}} d\gamma \right] \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\tilde{\sigma}_1(\varphi) + \frac{\lambda_1}{2} \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_1(\alpha) d\alpha -$$

$$-\rho \lambda_1 \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_2(\beta) \frac{R \cos \varphi + \rho - \rho \cos(\beta - \varphi)}{R^2 + 2\rho R(\cos \beta - \cos \varphi) + 4\rho^2 \sin^2 \frac{\beta - \varphi}{2}} d\beta - \quad (9)$$

$$-\rho \lambda_1 \int_0^{2\pi} \tilde{\sigma}_3(\gamma) \frac{-R \cos \varphi + \rho - \rho \cos(\gamma - \varphi)}{R^2 - 2\rho R(\cos \gamma - \cos \varphi) + 4\rho^2 \sin^2 \frac{\gamma - \varphi}{2}} d\gamma = \rho \lambda_1 \tilde{f}_1(\varphi).$$

$$\lambda_1 = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \frac{1}{\pi}. \quad (10)$$

$$\tilde{f}_1(\varphi) = -\cos \varphi F_1(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi) - \sin \varphi F_2(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi).$$

Аналогично, на границах  $G_2$  и  $G_3$  получаем следующие уравнения:

$$\begin{aligned} & \bar{\sigma}_2(\varphi) + \frac{\lambda_1}{2} \int_0^{2\pi} \bar{\sigma}_2(\beta) d\beta - \\ & - \rho \lambda_1 \int_0^{2\pi} \bar{\sigma}_1(\alpha) \frac{R \cos \varphi + \rho - \rho \cos(\alpha - \varphi)}{R^2 + 2\rho R(\cos \alpha - \cos \varphi) + 4\rho^2 \sin^2 \frac{\alpha - \varphi}{2}} d\alpha - \\ & - \rho \lambda_1 \int_0^{2\pi} \bar{\sigma}_1(\gamma) \frac{-R \cos \varphi + \rho - \rho \cos(\alpha - \varphi)}{R^2 - 2\rho R(\cos \alpha - \cos \varphi) + 4\rho^2 \sin^2 \frac{\alpha - \varphi}{2}} d\gamma = \rho \lambda_1 \bar{f}_2(\varphi), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \bar{\sigma}_3(\varphi) + \frac{\lambda_1}{2} \int_0^{2\pi} \bar{\sigma}_3(\gamma) d\gamma - \\ & - \rho \lambda_1 \int_0^{2\pi} \bar{\sigma}_1(\alpha) \frac{R \cos \varphi + \rho - \rho \cos(\alpha - \varphi)}{R^2 + 2\rho R(\cos \alpha - \cos \varphi) + 4\rho^2 \sin^2 \frac{\alpha - \varphi}{2}} d\alpha - \\ & - \rho \lambda_1 \int_0^{2\pi} \bar{\sigma}_2(\beta) \frac{-R \cos \varphi + \rho - \rho \cos(\beta - \varphi)}{R^2 - 2\rho R(\cos \beta - \cos \varphi) + 4\rho^2 \sin^2 \frac{\beta - \varphi}{2}} d\beta = \rho \lambda_1 \bar{f}_3(\varphi). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь

$$\begin{aligned} f_2(\varphi) &= F_1(-R + \rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi)(-\cos \varphi) + \\ & + F_2(-R + \rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi)(-\sin \varphi), \\ f_3(\varphi) &= F_1(R + \rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi)(-\cos \varphi) + \\ & + F_2(R + \rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi)(-\sin \varphi). \end{aligned}$$

На основании программы получаем величину напряженности электрического поля и ее зависимость  $E(x)$  от расстояния между фазами для точки "А" (рис.2). При увеличении этого расстояния напряженность поля снижается. Кроме того, видно изменение напряженности центральной фазы от наличия двух соседних фаз.



Рис.2. Зависимость напряженности от расстояния между фазами при  $\epsilon_1=1$ ;  $\epsilon_2=2.2$

Теперь эти величины необходимо сравнить со случаем, когда изолированные фазы кабеля скручены между собой и расположены в металлической оболочке. Ввиду того, что фазы кабеля скручены, то имеем спиральные линии, электрические поля которых тоже спиральные, то есть имеем трехмерное электрическое поле. Компоненты ( $E_x, E_y, E_z$ ) этого поля приведены в [2], где отчетливо видно, что величина напряженности кабеля со скрученными фазами значительно отличается от напряженности кабеля с параллельно расположенными фазами [3]. Кроме того, компоненты поля, отраженные от металлической оболочки, увеличивают напряженность на фазах по меньшей мере на 10...12% (см. таблицу расчетов X, Y, Z в [2]). Одновременно из (10) получим

$$E_{\max} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} U_{\phi}}{2r_0 \text{Arch}(x/r_0)} \quad (13)$$

где  $r_0$  - радиус токопроводящей линии, а  $x$  - расстояние между центрами фаз.

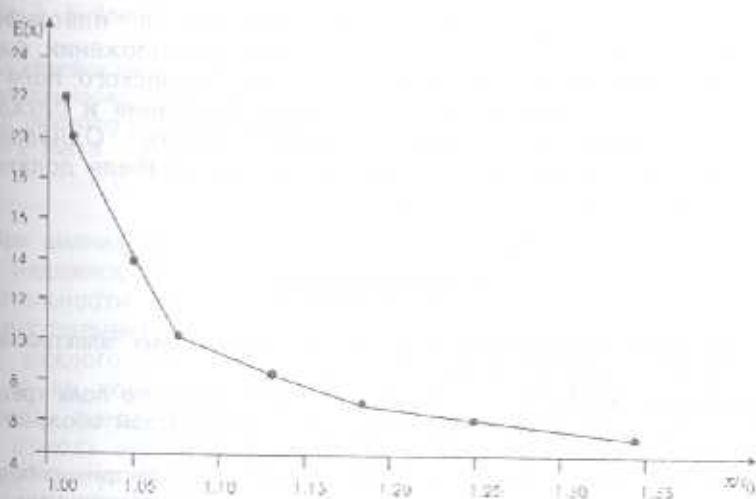


Рис. 3. Зависимость напряженности от расстояния между неизолированными линиями

Сравнительные расчеты показывают, что при  $\epsilon_1 = \epsilon_2$  и  $\lambda = ()$  величина напряженности поля, рассчитанная по формулам (8)-(12), приблизительно приравнивается к напряженности неизолированных линий (рис. 3 и 4). Единственное различие заключается в том, что на этой напряженности, когда фазы кабеля находятся близко, на них воздействует третья фаза.

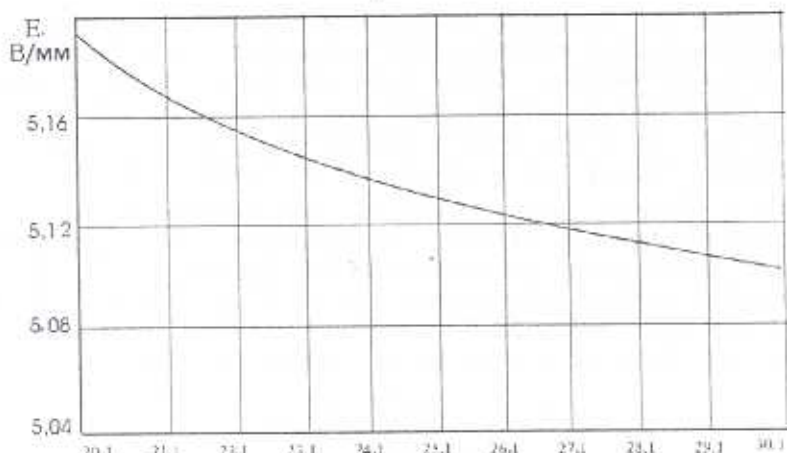


Рис. 4. Зависимость напряженности от расстояния между фазами при  $\epsilon_1=1$ ;  $\epsilon_2=1$ ,  $\lambda=0$

Таким образом, применение кабелей с пластмассовой изоляцией и оболочкой при параллельном расположении фаз даст возможность уменьшить напряженность электрического поля между фазами, устранить межфазовые короткие замыкания и блуждающие токи и значительно снизить себестоимость. Одновременно необходимо отметить, что в этом случае фазы кабеля должны быть расположены в бетонных траншеях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тозони О.В., Майергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей.- Киев: Техника, 1974.-352 с.
2. Мирзабекян Ж.М. Метод определения электрического поля трехфазного кабеля со сплошной фазовой изоляцией в металлической оболочке // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН, - 1996.-Т.49, № 2. - С.89-96.
3. Мирзабекян Ж.М., Рубанович С.Г. Определение электрических потерь в экране симметрических кабелей с многократно скрученными жилами // Электричество. - 1982. - №1 - С.37-42.

- ГИУА

14.04.1998