

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Ж. М. МИРЗАБЕКЯН, Р. А. АЛИХАНИЯ

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЕМКОСТИ СИММЕТРИЧНЫХ ПЯТИЧЕТВЕРОЧНЫХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

В настоящее время для осуществления надежной и высококачественной передачи информации, а также повышения эффекта применения многоканальных систем на соединительных линиях городских телефонных сетей применяются кабели четверочные пучковой скрутки (5X4), экранированные (металлическим экраном) или неэкранированные.

Исследования показывают, что расчетные величины рабочей емкости таких кабелей резко отличаются от результатов экспериментов. Это отличие результат того, что диэлектрик окружающей среды принимается однородным, ему присваивается некоторое эквивалентное значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и не учитывается влияние соседних изолированных проводников.

В настоящей работе эта задача решается методом последовательных приближений с использованием некоторых положений [1] и вылаются конечные формулы для использования в инженерных расчетах потенциалов и емкости пятичетверочных симметричных кабелей.

Поперечное сечение пятичетверочного экранированного кабеля пучковой скрутки представлено на рис., где для одной четверки показаны рассматриваемые области изоляции  $D_k$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$ ; границы переходов от проводника к изоляции  $\Gamma_k$  и  $\Gamma_{k+1}$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ) и область  $D_0$  между изолированными проводниками и экраном  $\Gamma_0$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ . Изменения потенциала в остальных четверках достигается путем поворота рассматриваемой четверки на угол  $0,4\pi m$  ( $m = 1, 2, 3, 4$ ). Потенциалы электрического поля в областях  $D_k$  обозначены через  $U_k(x, y)$  ( $k = 0, 1, 2, 3, 4$ ). Они являются решением следующей задачи — в областях  $D_k$  найти гармонические функции  $U_k(x, y)$ , удовлетворяющие граничным условиям:

$$u_1|_{\Gamma_0} = c; \quad u_2|_{\Gamma_0} = -c; \quad u_3|_{\Gamma_0} = -c; \quad u_4|_{\Gamma_0} = c; \quad (1)$$

$$U_k = U_0 \text{ на } \Gamma_k, \quad k = 1, 2, 3, 4; \quad (2)$$

$$\epsilon_1 \frac{\partial U_k}{\partial n} = \epsilon_2 \frac{\partial U_0}{\partial n} \text{ на } \Gamma_k, \quad k = 1, 2, 3, 4; \quad (3)$$

$$U_0 = 0 \text{ на } \Gamma_0. \quad (4)$$

Решение этой задачи ищем в виде:

$$U_1(z) = \operatorname{Re} \left[ \varphi \left( \frac{z-a}{R} - \varphi \left( \frac{r_0 r}{z-a} \right) \right) + c_1 \ln \frac{|z-a|}{r} + c; \quad (5) \right.$$

$$U_2(z) = \operatorname{Re} \left[ \varphi \left( \frac{z-b}{R} \right) - \Psi \left( \frac{r_0 r}{z-b} \right) \right] + c_2 \ln \frac{|z-b|}{r} + c; \quad (6)$$

$$U_3(x, y) = U_1(-x, y); \quad U_4(x, y) = U_1(-x, y);$$

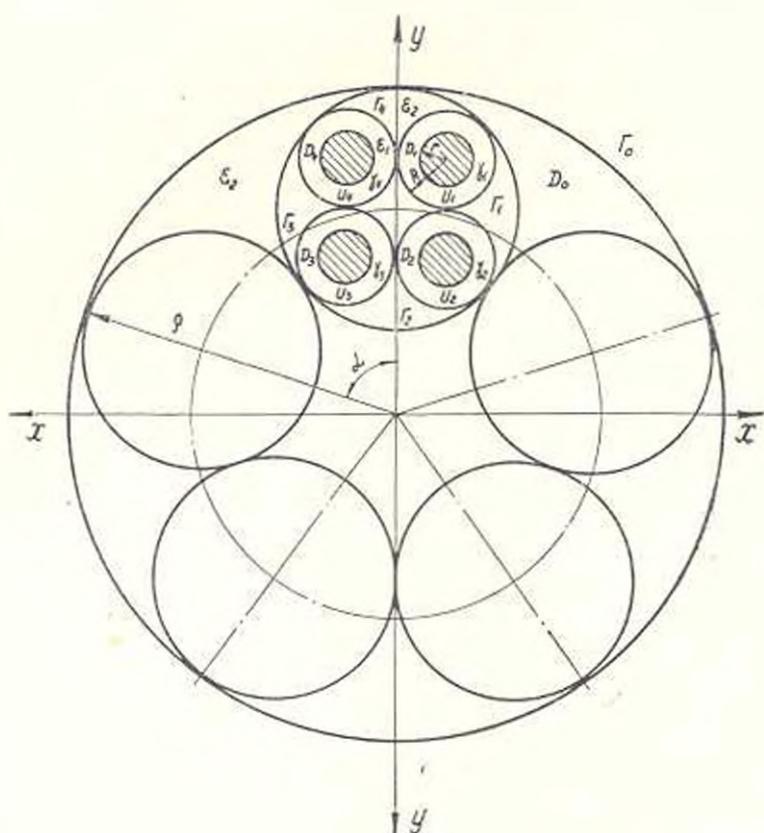


Рис. Поперечное сечение пятичетверочного экранированного кабеля пучковой скрутки.

$$U_0(z) = \sum_{k=0}^4 \operatorname{Re} \left[ g \left( \frac{R}{\omega_k z - a} \right) + g \left( -\frac{R}{\omega_k z + \bar{a}} \right) + h \left( \frac{R}{\omega_k z - b} \right) + h \left( -\frac{R}{\omega_k z + \bar{b}} \right) + c_3 \ln |\bar{\omega}_k z - a| |\bar{\omega}_k z + \bar{a}| + c_4 \ln |\bar{\omega}_k z - b| |\bar{\omega}_k z + \bar{b}| \right] + \operatorname{Re} \varphi \left( \frac{z}{R} \right) + c_5, \quad (7)$$

где  $r_0 = \frac{r}{R}$ ;  $z = x + iy$  ( $i$  — мнимая единица);  $\bar{a}$  и  $\bar{b}$  — комплексное

сопряженные  $a$  и  $b$ ;  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  — действительные постоянные  $\varphi(z), \Psi(z), g(z), h(z), \eta(z)$  — аналитические функции в единичном круге  $|z| < 1$ , коэффициенты ряда Тейлора которых в окрестности точки  $z = 0$  действительны и

$$\varphi(0) = \Psi(0) = g(0) = h(0) = \eta(0) = 0;$$

$$a = R + iR \left( 1 + \frac{1 + \sqrt{2}}{\sin \alpha} \right); \quad b = a - 2Ri; \quad (8)$$

$$w_k = e^{i k \alpha}; \quad \rho = R \left( \frac{1 + \sqrt{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 + \sqrt{2} \right); \quad \alpha = 0,4\pi.$$

Подставляя (5) — (7) в граничные условия (2), (3) и учитывая условия (8) при  $k = 1, 2$ , получим следующие уравнения в круге  $|z| < 1$

$$\begin{aligned} \varphi(z) - \varphi(r_0^2 z) - c_1 \ln r_0 + c = g(z) + \sum_{k=1}^4 G \left( \frac{w_k}{z + \lambda_{1k}} \right) + \\ + \sum_{k=0}^4 \left[ g \left( -\frac{w_k}{z + \lambda_{2k}} \right) + h \left( \frac{w_k}{z + \lambda_{3k}} \right) + h \left( -\frac{w_k}{z + \lambda_{4k}} \right) \right] + \\ + \eta \left( \frac{Rz + a}{\rho} \right) + 10(c_3 + c_4) \ln R + c_5 \ln(z + \lambda_{20}) + \\ + c_3 \sum_{k=1}^4 \ln(z + \lambda_{1k})(z + \lambda_{2k}) + c_4 \sum_{k=0}^4 \ln(z + \lambda_{3k})(z + \lambda_{4k}) + c_5; \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon [\varphi'(z) + \varphi'(r_0^2 z) r_0^2] = -g'(z) - \sum_{k=1}^4 g' \left( \frac{w_k}{z + \lambda_{1k}} \right) \frac{w_k}{(z + \lambda_{1k})^2} + \\ + \sum_{k=0}^4 \left[ g' \left( -\frac{w_k}{z + \lambda_{2k}} \right) \frac{w_k}{(z + \lambda_{2k})^2} - h' \left( \frac{w_k}{z + \lambda_{3k}} \right) \frac{w_k}{(z + \lambda_{3k})^2} + \right. \\ \left. + h' \left( -\frac{w_k}{z + \lambda_{4k}} \right) \frac{w_k}{(z + \lambda_{4k})^2} + \frac{c_4}{z + \lambda_{3k}} + \frac{c_4}{z + \lambda_{4k}} + \frac{c_3}{z + \lambda_{2k}} \right] + \\ + c_3 \sum_{k=1}^4 \frac{1}{z + \lambda_{1k}} + \eta' \left( \frac{Rz + a}{\rho} \right) \frac{R}{\rho}; \quad (10) \end{aligned}$$

$$\varepsilon c_1 = c_5; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Psi(z) - \Psi(r_0^2 z) - c_2 \ln r_0 - c = h(z) + \sum_{k=1}^4 h \left( \frac{w_k}{z + \mu_{1k}} \right) + \\ + \sum_{k=0}^4 \left[ h \left( -\frac{w_k}{z + \mu_{2k}} \right) + g \left( \frac{w_k}{z + \mu_{3k}} \right) + g \left( -\frac{w_k}{z + \mu_{4k}} \right) \right] + \\ + \eta \left( \frac{Rz + b}{\rho} \right) + 10(c_3 + c_4) \ln R + c_5 \sum_{k=0}^4 \ln(z + \mu_{3k})(z + \mu_{4k}) + \\ + c_4 \sum_{k=1}^4 \ln(z + \mu_{1k})(z + \mu_{2k}) + c_4 \ln(z + \mu_{20}) + c_5; \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \{ \Psi''(z) + \Psi''(r_0^2 z) r_0^2 \} = & -h'(z) - \sum_{k=1}^4 h' \left( \frac{\omega_k}{z + \mu_{1k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{1k})^2} + \\ & + \sum_{k=0}^4 \left[ h' \left( -\frac{\omega_k}{z + \mu_{2k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{2k})^2} - g' \left( \frac{\omega_k}{z + \mu_{3k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{3k})^2} + \right. \\ & \left. + g' \left( -\frac{\omega_k}{z + \mu_{4k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{4k})^2} + \frac{c_3}{z + \mu_{2k}} + \frac{c_3}{z + \mu_{3k}} + \frac{c_4}{z + \mu_{4k}} \right] + \\ & + c_4 \sum_{k=1}^4 \frac{1}{z + \mu_{1k}} + \eta' \left( \frac{Rz + b}{\rho} \right) \frac{R}{\rho}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\varepsilon c_2 = c_3, \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \lambda_{1k} &= \frac{a - a\omega_k}{R}; & \lambda_{2k} &= \frac{a + \bar{a}\omega_k}{R}; & \lambda_{3k} &= \frac{a - b\omega_k}{R}; \\ \lambda_{4k} &= \frac{a + \bar{b}\omega_k}{R}; & \mu_{1k} &= \frac{b - b\omega_k}{R}; & \mu_{2k} &= \frac{b + \bar{b}\omega_k}{R}; \\ \mu_{3k} &= \frac{b + \bar{a}\omega_k}{R}; & \mu_{4k} &= \frac{b - \bar{a}\omega_k}{R}. \end{aligned}$$

Из условия (4) имеем:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^4 \left[ g \left( \frac{Rz}{\omega_k \rho - az} \right) + g \left( -\frac{Rz}{\omega_k \rho + az} \right) + h \left( \frac{Rz}{\omega_k \rho - bz} \right) + \right. \\ \left. + h \left( -\frac{Rz}{\omega_k \rho + bz} \right) \right] + \chi(z) + c_3 \sum_{k=0}^4 \ln(\omega_k \rho - \bar{a}z) (\omega_k \rho + az) + \\ + c_4 \sum_{k=0}^4 \ln(\omega_k \rho - \bar{b}z) (\omega_k \rho + bz) + c_5 = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Продифференцировав (9), (12) и (15) по  $z$  и решая совместно с (10) и (13), получим:

$$\begin{aligned} \varphi'(z) = \frac{1}{\varepsilon + 1} \left\{ (1 - \varepsilon) r_0^2 \varphi'(r_0^2 z) - 2 \sum_{k=1}^4 g' \left( \frac{\omega_k}{z + \lambda_{1k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \lambda_{1k})^2} + \right. \\ \left. + 2 \sum_{k=0}^4 \left[ g' \left( -\frac{\omega_k}{z + \lambda_{2k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \lambda_{2k})^2} - h' \left( \frac{\omega_k}{z + \lambda_{3k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \lambda_{3k})^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + h' \left( -\frac{\omega_k}{z + \lambda_{4k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \lambda_{4k})^2} \right] + 2\eta' \left( \frac{Rz + a}{\rho} \right) \frac{R}{\rho} + \right. \\ \left. + 2c_4 \sum_{k=0}^4 \left( \frac{1}{z + \lambda_{3k}} + \frac{1}{z + \lambda_{4k}} \right) + 2c_3 \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{z + \lambda_{1k}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{z + \lambda_{2k}} \right) + 2c_5 \frac{1}{z + \lambda_{20}} \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 g'(z) = & \frac{1}{1+\varepsilon} - 2\varepsilon r_0^2 \varphi'(r_0^2 z) + (\varepsilon - 1) \sum_{k=1}^4 g' \left( \frac{\omega_k}{z + \lambda_{1k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \lambda_{1k})^2} + \\
 & + (1 - \varepsilon) \sum_{k=0}^4 \left[ g' \left( -\frac{\omega_k}{z + \lambda_{2k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \lambda_{2k})^2} - h' \left( \frac{\omega_k}{z + \lambda_{3k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \lambda_{3k})^2} + \right. \\
 & \left. + h' \left( -\frac{\omega_k}{z + \lambda_{4k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \lambda_{4k})^2} \right] + (1 - \varepsilon) \eta' \left( \frac{Rz + a}{\rho} \right) \frac{R}{\rho} + \\
 & + (1 - \varepsilon) c_4 \sum_{k=0}^4 \left( \frac{1}{z + \lambda_{3k}} + \frac{1}{z + \lambda_{4k}} \right) + \\
 & + (1 - \varepsilon) c_3 \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{z + \lambda_{1k}} + \frac{1}{z + \lambda_{2k}} \right) + c_3 \frac{(1 - \varepsilon)}{z + \lambda_{20}};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Psi'(z) = & \frac{1}{1+\varepsilon} \left\{ (1 - \varepsilon) r_0^2 \Psi'(r_0^2 z) - 2 \sum_{k=1}^4 h' \left( \frac{\omega_k}{z + \mu_{1k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{1k})^2} + \right. \\
 & + 2 \sum_{k=0}^4 \left[ -g' \left( \frac{\omega_k}{z + \mu_{3k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{3k})^2} \right] + g' \left( -\frac{\omega_k}{z + \mu_{4k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{4k})^2} + \\
 & \left. + h' \left( -\frac{\omega_k}{z + \mu_{2k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{2k})^2} \right] + 2\eta' \left( \frac{Rz + b}{\rho} \right) \frac{R}{\rho} + c_3 \sum_{k=0}^4 \left( \frac{1}{z + \mu_{3k}} + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{z + \mu_{4k}} \right) + 2c_4 \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{z + \mu_{1k}} + \frac{1}{z + \mu_{2k}} \right) + \frac{2c_4}{z + \mu_{20}} \Big\};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h'(z) = & \frac{1}{1+\varepsilon} \left\{ -2\varepsilon r_0^2 \Psi'(r_0^2 z) + (\varepsilon - 1) \sum_{k=1}^4 h' \left( \frac{\omega_k}{z + \mu_{4k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{4k})^2} + \right. \\
 & + (1 - \varepsilon) \sum_{k=0}^4 \left[ -g' \left( \frac{\omega_k}{z + \mu_{3k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{3k})^2} + g' \left( -\frac{\omega_k}{z + \mu_{4k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{4k})^2} + \right. \\
 & \left. + h' \left( -\frac{\omega_k}{z + \mu_{2k}} \right) \frac{\omega_k}{(z + \mu_{2k})^2} \right] + (1 - \varepsilon) \eta' \left( \frac{Rz + b}{\rho} \right) \frac{R}{\rho} + \\
 & + (1 - \varepsilon) c_3 \sum_{k=0}^4 \left( \frac{1}{z + \mu_{3k}} + \frac{1}{z + \mu_{4k}} \right) + \\
 & + (1 - \varepsilon) c_4 \sum_{k=1}^4 \left( \frac{1}{z + \mu_{1k}} + \frac{1}{z + \mu_{2k}} \right) + \frac{c_4(1 - \varepsilon)}{z + \mu_{20}};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \eta'(z) = & \sum_{k=0}^4 \left[ -g' \left( \frac{Rz}{\omega_k \rho - \bar{a}z} \right) \frac{R\omega_k \rho}{(\omega_k \rho - \bar{a}z)^2} + g' \left( -\frac{Rz}{\omega_k \rho + az} \right) \times \right. \\
 & \times \frac{R\omega_k \rho}{(\omega_k \rho + az)^2} - h' \left( \frac{Rz}{\omega_k \rho - \bar{b}z} \right) \frac{R\omega_k \rho}{(\omega_k \rho - \bar{b}z)^2} + \\
 & \left. + h' \left( -\frac{Rz}{\omega_k \rho + bz} \right) \frac{R\omega_k \rho}{(\omega_k \rho + bz)^2} \right] - c_3 \sum_{k=0}^4 \left( \frac{-\bar{a}}{\omega_k \rho - \bar{a}z} + \frac{a}{\omega_k \rho + az} \right) - \\
 & - c_4 \sum_{k=0}^4 \left( -\frac{\bar{b}}{\omega_k \rho - \bar{b}z} + \frac{b}{\omega_k \rho + bz} \right). \tag{16}
 \end{aligned}$$

Из уравнений (9), (12) и (15) при  $z = 0$  с учетом условий (8) и равенств (11) и (14) получаем следующую систему уравнений для определения неизвестных коэффициентов  $c_k$ :

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon c_1 &= c_3; \\ \varepsilon c_2 &= c_4; \\ -c_1 \ln r_0 + c - p + 10(c_3 + c_4) \ln R + c_3 \sum_{k=1}^4 \ln |\lambda_{1k} \lambda_{2k}| + \\ &+ c_2 \ln |\lambda_{20}| + c_4 \sum_{k=0}^4 \ln |\lambda_{3k} \lambda_{4k}| + c_5; \\ -c_2 \ln r_0 + c - q + 10(c_3 + c_4) \ln R + c_3 \sum_{k=1}^4 \ln |\mu_{3k} \mu_{4k}| + \\ &+ c_4 \ln |\mu_{20}| + c_4 \sum_{k=1}^4 \ln |\mu_{2k} \mu_{1k}| + c_5; \\ 10(c_3 + c_4) \ln p + c_5 &= 0, \end{aligned} \right. \quad (17)$$

где

$$p = \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 g\left(\frac{\omega_k}{\lambda_{1k}}\right) + \operatorname{Re} \sum_{k=0}^4 \left[ g\left(-\frac{\omega_k}{\mu_{3k}}\right) + h\left(\frac{\omega_k}{\lambda_{2k}}\right) + h\left(-\frac{\omega_k}{\lambda_{4k}}\right) \right] + \operatorname{Re} \gamma\left(\frac{a}{p}\right); \quad (18)$$

$$q = \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 h\left(\frac{\omega_k}{\mu_{1k}}\right) + \operatorname{Re} \sum_{k=0}^4 \left[ g\left(\frac{\omega_k}{\mu_{3k}}\right) + g\left(-\frac{\omega_k}{\mu_{4k}}\right) + h\left(-\frac{\omega_k}{\mu_{2k}}\right) \right] + \operatorname{Re} \gamma\left(\frac{b}{p}\right). \quad (19)$$

Система (16), (17) решается методом последовательных приближений.

Определяя емкость цепи формулой:

$$C = \frac{\varepsilon_1}{2c} \int_{r_1}^r \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} dS,$$

находим, что

$$C = \pi \varepsilon_1 c_1. \quad (20)$$

Подставляя соответствующие приближения  $c_1$  в (20), получим емкость экранированной кабельной цепи пучковой скрутки.

Экспериментально определена емкость образцов симметричных кабелей пучковой скрутки с различными соотношениями изолированных жил и сопоставлена с расчетными данными. Расхождение результатов расчета по (20) и полученным экспериментально составляет не более 7%.

ՓՆՋԱՅԻՆ ՈՒՈՐՈՒՄՈՎ ՔԱՌԱՋԻՎ ԿԱՔԵԼԱՏԻՆ ՇՂԹԱՆՆԵՐԻ  
ՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ, շԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՎԵՐԼՈՒՄԱԿԱՆ ՄՆԹՈՂ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հետազոտությունները ցույց են առաջի, որ փնջային ոլորումով բառաջիկ կաբելների բանվորական ունակությունների որոշման համար գրականության մեջ բերված տեսական, մոտավոր կամ էմպիրիկ բանաձևերով կատարված հաշվարկների տվյալները խիստ տարբերվում են փորձնական արդյունքներից:

Հողվածում արված են փնջային ոլորումով բառաջիկ կապի կաբելների պոտենցիալների և ունակությունների որոշման վերլուծական մեթոդ: Առաջարկվում է ինդիքը լուծել պոտենցիալների աեսության հիման վրա՝ վերլուծական ֆունկցիաների հաջորդաբար մոտեցման եղանակով, որտեղ բանվորական ունակության բանաձևեր դրվում է ակնհայտ ձևով, իսկ հաշվարկային և փորձնական տվյալների տարբերությունը աննշան է:

Л И Т Е Р А Т У Р А

- 1 Мирзайекян Ж. М., Амхчанян Р. А. Расчет рабочей емкости симметричных кабельных цепей плоской скрутки. «Электричество», 1981, № 3, с. 72—74