

Р.А. ХАЧАТРЯН

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ДВУЖИЛЬНЫХ ВОДОСТОЙКИХ МИКРОЭМАЛЬПРОВОДОВ

Развитие систем малогабаритной линии связи непосредственно связано с созданием двухжильных эмальпроводов микронных размеров. В связи с этим возникла необходимость предварительно определить толщины лаковых покрытий в зависимости от приложенного к проводам электрического напряжения и свойств применяемых лаков. С этой целью разработана теория электрического расчета по определению толщины эмалевого изоляции в зависимости от величины приложенного к проводам электрического напряжения и свойств применяемых лаков.

**Ключевые слова:** двухжильный провод, изоляция, лак, емкость, напряженность электрического поля.

К двухжильным водостойким эмальпроводам предъявляются требования не как к обмоточным проводам, а как к малогабаритной линии, связывающей отдельные объекты управления [1, 2].

Целью настоящей работы является разработка электрического расчета двухжильного водостойкого микроэмальпровода для определения толщины эмалевого изоляции провода в зависимости от приложенного электрического напряжения и свойств применяемых лаков.

На рис. 1 и 2 показано поперечное сечение двухжильного микроэмальпровода.

В области изоляций  $D_1$  и  $D_2$  с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  границы переходов от проводника к эмалевого изоляции обозначим через  $\Gamma_1$ , а от первого эмалевого слоя ко второму -  $\Gamma_2$ . Потенциалы в области  $D_1$ ,  $D_2$  обозначим  $U_1(x,y)$ ,  $U_2(x,y)$ . Необходимо найти гармонические функции, удовлетворяющие граничным условиям:

на границе  $\Gamma_1$ :

$$U_1(x,y) = U_0; \quad (1)$$

на границе  $\Gamma_2$ :

$$U_1(x,y) = U_2(x,y); \quad (2)$$

$$\left. \frac{\delta U_1(x,y)}{\delta n} \right|_{\Gamma_1} = \varepsilon_2 \left. \frac{\delta U_2(x,y)}{\delta n} \right|_{\Gamma_2}. \quad (3)$$

Решение данной задачи ищем в виде

$$U_1(z) = \left[ \varphi \left( \frac{z-a}{R} \right) \right] - \varphi \left( \frac{z_0^2 - R}{z-a} \right) + C_0 \ln \frac{(z-a)}{2} + U_0, \quad (4)$$

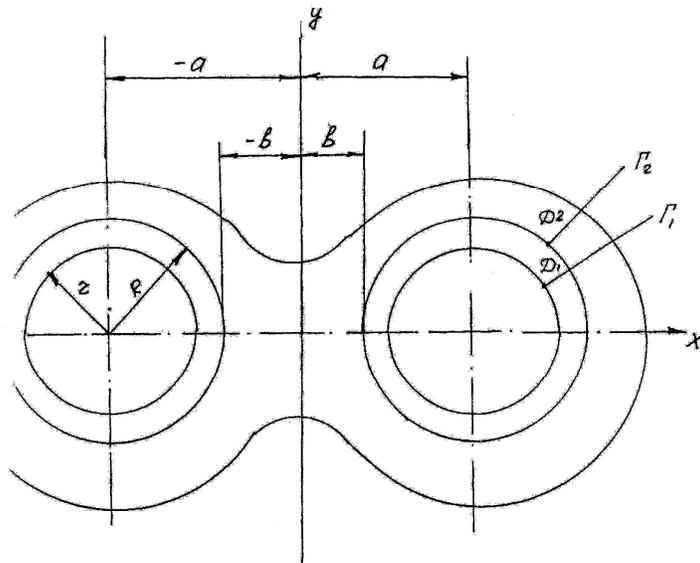


Рис. 1

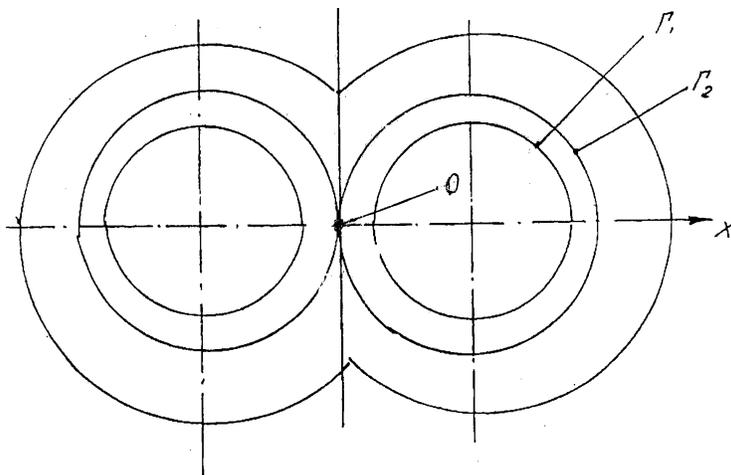


Рис. 2

$$U_2(z) = R_e \left[ \psi \left( \frac{R}{z-a} \right) - \psi \left( \frac{R}{z+a} \right) + C_1 \ln \left( \frac{z+a}{z-a} \right) \right], \quad (5)$$

где  $z=x+iy$ ;  $C_0, C_1$  – действительные постоянные;  $z_0=z/R$ ;  $\varphi(z)$  и  $\psi(z)$  – аналитические в единичном круге функции, удовлетворяющие условиям:

- а)  $\varphi(z)$  и  $\psi(z)$  в окрестности точки  $z=0$  действительны;  
 б)  $\varphi(0) = \psi(0) = 0$ . (6)

Используя условие (2), можем записать

$$R_e \left[ \varphi(t) - \varphi \left( \frac{z_0^2}{t} \right) \right] - C_0 \ln t z_0 + U_0 = R_e \left[ \varphi \left( \frac{1}{t} \right) \right] - \varphi \left( -\frac{1}{z+a} \right) + C_1 \ln(t-a)(t) = 1, \quad (7)$$

где  $t = \frac{z-a}{R}$ ;  $\alpha = \frac{2a}{R}$ .

В результате имеем

$$R_e \varphi(\bar{z}) = R_e \varphi(z) - R_e \psi(\bar{z}) = R_e \psi(\bar{z}), \quad (8)$$

где  $\bar{z}$  – сопряженная с  $z$  величина:  $\bar{z} = 1/z$ ;

$$(t) = 1; R_e \varphi \left( \frac{z_0^2}{t} \right) = R_e \varphi(z_0^2 t), \quad (9)$$

$$R_e \psi \left( \frac{1}{t} \right) = R \psi(\bar{t}) = R_e \psi(t). \quad (10)$$

Следовательно, равенство (7) можно представить в виде

$$R_e [\varphi(t) - \varphi(z_0 t)] - \psi(t) + \psi \left( -\frac{1}{t+a} \right) - C_1 \ln(t+a) - C_0 \ln z_0 + U_0 = 0. \quad (11)$$

Так как на границе  $(z)=1$  их реальные части равны и в точке  $z=0$  принимают действительные значения, то эти функции равны, т.е.

$$\varphi(t) - \varphi(z_0^2 t) - \psi(t) + \psi \left( -\frac{1}{t+a} \right) - C_1 \ln \left[ (t+a) \frac{1}{t} \right] - C_0 \ln z_0 + U_0 = 0. \quad (12)$$

Подставляя  $U_1(z)$  и  $U_2(z)$  из (4) и (5) в (3) и дифференцируя их, получим

$$\begin{aligned} & R_e \varepsilon \left[ t\varphi'(t) + \frac{z_0^2}{t} \varphi' \left( \frac{z_0^2}{t} \right) \right] + C_0 = \\ & = R_e \left[ -\frac{1}{t} \psi' \left( \frac{1}{t} \right) - \frac{t}{(t+\alpha)^2} \psi' \left( -\frac{t}{t+\alpha} \right) \right] + C_1 \left( \frac{1}{t+\alpha} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

С учетом (8) и (9) преобразуем (13) к виду

$$R_e \varepsilon \left\{ [t\varphi'(t) + z_0^2 t\varphi'(z_0^2 t) + C_0] + \frac{t}{(t+\alpha)_e^2} \psi' \left( -\frac{t}{t+\alpha} \right) - C_1 \left( \frac{1}{t+\alpha} \right) \right\} = 0, \quad (14)$$

где  $\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ .

При  $t=0$  получим

$$-\varepsilon C_0 = C_1. \quad (15)$$

С учетом (15) после сокращения по  $t$  представим (14) в виде

$$\varepsilon [t\varphi'(t) + z_0^2 t\varphi'(z_0^2 t)] + \frac{t}{(t+\alpha)_e^2} \psi' \left( -\frac{t}{t+\alpha} \right) - C_1 \left( \frac{1}{t+\alpha} \right) = 0. \quad (16)$$

Принимая

$$\varphi'(t) = C_1 \varphi_1(t), \quad \psi'(t) = C_1 \psi_1(t), \quad (17)$$

получим

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) - \psi_1(t) &= z_0^2 t\varphi_1(z_0^2 t) - \frac{t}{(t+\alpha)^2} \psi_1 \left( -\frac{t}{t+\alpha} \right) + \left( \frac{1}{t+\alpha} \right), \\ \varepsilon \varphi_1(t) - \psi_1(t) &= -\varepsilon z_0^2 t\varphi_1(z_0^2 t) - \frac{t}{(t+\alpha)^2} \psi_1 \left( -\frac{t}{t+\alpha} \right) + \left( \frac{1}{t+\alpha} \right), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\varphi_1(t) = C_1 \int_0^t \varphi_1(t) dt; \quad \psi_1(t) = \int_0^t \psi_1(t) dt = C_1 \omega(t). \quad (19)$$

При  $t=0$  уравнение (12) представляется в виде

$$\begin{aligned} \psi \left( -\frac{1}{\alpha} \right) &= C_1 \ln \alpha + C_0 \ln r_0 - U_0, \\ \psi \left( -\frac{1}{\alpha} \right) - C_1 \ln \alpha - C_0 \ln r_0 + U_0 &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

или

$$C_1 \omega \left( -\frac{1}{\alpha} \right) - C_1 \ln \alpha - C_0 \ln r_0 + U_0 = 0. \quad (21)$$

Решая (15) и (21) относительно  $C_0$  и  $C_1$ , получим

$$C_0 = \frac{U_0}{\varepsilon \omega \left( -\frac{1}{\alpha} \right) - \varepsilon \ln \alpha + \ln \varepsilon_0}, \quad (22)$$

$$C_1 = \frac{-\varepsilon U_0}{\varepsilon \omega \left( -\frac{1}{\alpha} \right) - \varepsilon \ln \alpha + \ln r_0}. \quad (23)$$

После некоторых преобразований представим (18) в виде

$$\varphi_1(t) = \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} r_0^2 \varphi_1(r_0^2 t) - \frac{2}{(1+\varepsilon)(\alpha+t)^2} \Psi_1\left(-\frac{1}{\alpha+t}\right) + \frac{2}{(1+\varepsilon)(\alpha+t)}, \quad (24)$$

$$\Psi_1(t) = \frac{2\varepsilon}{1+\varepsilon} r_0^2 \varphi_1(r_0^2 t) - \frac{1-\varepsilon}{(1+\varepsilon)(\alpha+t)^2} \Psi_1\left(-\frac{1}{\alpha+t}\right) + \frac{1-\varepsilon}{(1+\varepsilon)(\alpha+t)}. \quad (25)$$

При  $b=0$ ;  $\alpha = 2$  (рис.1) уравнения (24) и (25) принимают вид

$$\varphi_1(t) = \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} r_0^2 \varphi_1(r_0^2 t) - \frac{2}{(1+\varepsilon)(\alpha+t)^2} \Psi_1\left(-\frac{1}{2+t}\right) + \frac{2}{(1+\varepsilon)(2+t)}, \quad (26)$$

$$\Psi_1(t) = \frac{2\varepsilon}{1+\varepsilon} r_0^2 \varphi_1(r_0^2 t) - \frac{1-\varepsilon}{(1+\varepsilon)(2+t)^2} \Psi_1\left(-\frac{1}{2+t}\right) + \frac{1-\varepsilon}{(1+\varepsilon)(2+t)}. \quad (27)$$

В качестве нулевого приближения решения системы (26), (27) принимаем

$$[\varphi_1(t)]_0 = \frac{2}{(1+\varepsilon)(\alpha+t)^2}; \quad [\Psi_1(t)]_0 = \frac{1-\varepsilon}{(1+\varepsilon)(2+t)}. \quad (28)$$

Находим первое приближение:

$$[\varphi_1(t)]_1 = \frac{2(1-\varepsilon)}{(1+\varepsilon)^2} \left[ \frac{r_0^2}{2+r_0^2 t} - \frac{1}{(2+t)(3+2t)} + \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} \cdot \frac{1}{(2+t)} \right]. \quad (29)$$

В результате получим

$$[\varphi_1(t)]_1 = \frac{2(1-\varepsilon)}{(1+\varepsilon)^2} \left[ \frac{r_0^2}{2+r_0^2 t} - \frac{1}{(2+t)(3-2t)} \right] + \frac{2}{(1+\varepsilon)(2+t)},$$

$$[\varphi_1(t)]_1 = \frac{4\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2} \cdot \frac{r_0^2}{2+r_0^2 t} - \frac{(1-\varepsilon)^2}{(1+\varepsilon)^2} \cdot \frac{1}{(2+t)(3-2t)} + \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} \cdot \frac{1}{(2+t)}. \quad (30)$$

Из (17) и (19) определяем

$$[\varphi_1(t)]_1 = \frac{2(1-\varepsilon)}{(1+\varepsilon)^2} \left[ \ln\left(1 + \frac{r_0^2}{2} t\right) + \ln\left(\frac{6+3t}{6+4t}\right) \right] + \frac{2}{(1+\varepsilon)} \ln\left(1 + \frac{t}{2}\right), \quad (31)$$

$$[\varphi_1(t)]_1 = C_1(\omega(t))_1 = \left\{ \frac{4\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2} \ln\left(1 + \frac{r_0^2}{2}t\right) + \left(\frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon}\right)^2 \ln\left(\frac{6+3t}{6+4t}\right) + \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} \ln\left(1 + \frac{t}{2}\right) \right\}. \quad (32)$$

Подставляя (31) в (32), находим первое приближение для  $U_1(z)$  и  $U_2(z)$ :

$$U_1(z) = C_1 \left\{ \frac{2(1-\varepsilon)}{(1+\varepsilon^2)} \left[ \ln\left|2 + r_0^2 \frac{r-R}{R}\right| - \ln\left|\frac{R+2r}{R+r}\right| - \ln\left|2 + \frac{r_0^2 R}{r-R}\right| + \ln\left|\frac{(2r_0^2-3)R+3z}{(r_0^2-2)R+2z}\right| \right] - \frac{1}{\varepsilon} \ln\left|\frac{z-R}{R}\right| + \frac{2}{(1+\varepsilon)} \ln\left[\frac{z+R}{R} - \ln\left|2 + \frac{r_0^2 R}{z-R}\right|\right] \right\} + U_0, \quad (33)$$

где

$$C_1 = \frac{-\varepsilon U_0}{\varepsilon \omega\left(-\frac{1}{2}\right) - \varepsilon \ln 2 + \ln r_0}, \quad (34)$$

$$\omega\left[-\frac{1}{2}\right]_1 = -\frac{4\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2} \ln\left(1 - \frac{r_0^2}{4}\right) + \left(\frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon}\right)^2 \ln\left(\frac{9}{8}\right) + \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} \ln\left(\frac{3}{4}\right). \quad (35)$$

Учитывая, что в самых тяжелых условиях эмалевая изоляция находится в точке "0", где  $z=0$ , и дифференцируя  $U_1(x,y)$  электрического поля в точке "0", определяем "R" [3,4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_1(x,y)}{\delta n} = C_1 & \left[ \frac{z_1 - R}{R} \left( \frac{2(1-\varepsilon)r_0^2}{(1+\varepsilon)^2} \cdot \frac{1}{2R + r_0^2(z-R)} \right) + \frac{2(1-\varepsilon)r_0^4}{(1+\varepsilon)^2} \times \right. \\ & \times \frac{1}{2(z_1 - R) + Rr_0^4} + \frac{2(\varepsilon-1)r_0^2}{(1+\varepsilon)^2} \cdot \frac{z_1 - R}{[2(z_1 - R) + Rr_0^2][3(z_1 - R) + 2Rr_0^2]} + \\ & \left. + \frac{2r_0^2}{(1+\varepsilon)} \cdot \frac{1}{2(z_1 - Rr_0^2)} - \frac{1}{\varepsilon R} \right]. \quad (36) \end{aligned}$$

Подставляя  $z=0$  в (36), получим

$$\frac{\partial U_1(x, y)}{\partial n_1} = C_1 \frac{1}{R} \left[ -\frac{2(1-\varepsilon)r_0^2}{(1+\varepsilon)^2} \cdot \frac{1}{2+r_0^2} - \frac{2r_0^2}{(1+\varepsilon)(2-r_0^2)} + \frac{2(\varepsilon-1)}{(1+\varepsilon)^2} + \frac{2}{(1+\varepsilon)} - \frac{2(1-\varepsilon)r_0^4}{(1+\varepsilon)(2-r_0^4)} - \frac{2(\varepsilon-1)r_0^2}{(1+\varepsilon)^2(2-r_0^2)} - \frac{1}{\varepsilon} \right], \quad (37)$$

где  $\varepsilon_1 = 3$ ;  $\varepsilon_2 = 4$ ;  $\varepsilon = 0,75$ .

Учитывая, что  $r = 0,025$  мм, а толщина лаковой пленки намного меньше диаметра эмалевой проволоки, уравнение (37) упрощается, и его можно записать в виде

$$E_1 = \frac{C_1}{R} \left[ -\frac{2(1-\varepsilon)r_0^2}{(1+\varepsilon)^2} \cdot \frac{1}{2+r_0^2} - \frac{2r_0^2}{(1+\varepsilon)(2-r_0^2)} - \frac{2(\varepsilon-1)}{(1+\varepsilon)^2} - \frac{1}{\varepsilon} \right]. \quad (38)$$

Подставляя  $z = 0$ ;  $\varepsilon_1 = 3$ ;  $\varepsilon_2 = 4$ ;  $\varepsilon = 0,75$ ;  $U_0 = 1000$  В в (38), получим  $R=0,035$  мм (R-r), то есть толщину эмалевой изоляции.

Таким образом, получена требуемая толщина эмалевой изоляции в зависимости от напряжения и свойств применяемых лаков [5, 6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пешков И.Б.** Обмоточные провода. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
2. **Хачатрян Р.А., Мещанов Г.И.** Расчет режимов нагрева тончайшего провода в печах эмальагрегатов. – М., 1988.
3. **Берсон В.С., Хачатрян Р.А., Тумин И.М.** Инструмент и устройство для изготовления эмалированных проводов / Патент N3262519/07(04020).-1981.
4. **Хачатрян Р.А.** Определение оптимального числа проводов при эмалировании тончайших проводов в НТК. – Ташкент, 1980.
5. **Берсон В.Ц., Тумин И.М., Хачатрян Р.А.** Исследование возможности создания лаконосящих устройств с жесткими разъемами и калибрами высокоскоростных горизонтальных эмальагрегатов / Отчет НИР, рег. N8000443 ВНТИцентр., инв. NB925931. – М., 1983.
6. **Хачатрян Р.А.** и др. Исследование возможности получения цветных матовых покрытий на тончайших двужильных эмальпроводах / Отчет Р.Г.0183,00,35881, инв. N 02830082410. – М., 1984.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 19.04.2004.

Ռ.Հ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ԵՐԿՋԻՂ ԵՐԿՇԵՐՏ ՋՐԱԿԱՅՈՒՆ ՄԻԿՐՈԷՍԱԼԱԼԱՐԵՐԻ  
ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԵԹՈՂԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Փոքր չափերի կապի գծերի համակարգի զարգացումը ուղղակիորեն կապված է երկջիղ, երկշերտ միկրոէմալալարերի ստեղծման հետ, որի համար անհրաժեշտ է նախօրոք որոշել լաքի ծածկույթի հաստությունը՝ կախված ջղերի միջև տրված էլեկտրական լարման մեծությունից և օգտագործվող լաքերի հատկություններից: Այս իսկ նպատակով մշակված է երկջիղ, երկշերտ, ջրակայուն միկրոէմալալարերի էլեկտրական հաշվարկների տեսությունը, որի հիման վրա որոշված է էմալալարերի մեկուսացման հաստությունը՝ կախված էլեկտրական լարման մեծությունից և լարերի հատկություններից:

*Առանցքային բառեր.* երկջիղ լարեր, մեկուսիչ, լարում, լաք, ունակություն, էլեկտրական դաշտի լարվածություն:

R.H. KHACHATRYAN

DEVELOPMENT OF METHODS FOR ELECTRICAL CALCULATION OF  
TWO-STRAND RESISTANT MICROENAMEL WIRES

The development of small communication line system is directly connected with producing two-strand enamel wires of microdimensions. And a necessity arose for preliminary defining the thickness of lacquer coverings depending on wires of electric voltage and the properties of lacquer applied. The theory of electrical calculation is developed for defining the magnitude of electric voltage wires and properties of lacquer applied.

**Keywords:** Two-strand, isolation, lacquer, capacity, voltage of electric field.