

УДК 627.735.083.06

Людмила Дикмарова, Віталій Нічога  
 Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

## ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ КОАКСІАЛЬНОГО КАБЕЛЮ В ПРОВІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

© Дикмарова Людмила, Нічога Віталій, 2001

**Отримані аналітичні вирази для первинних і вторинних параметрів коаксіального кабелю, розташованого в провідному середовищі.**

**The analytical expressions for primary and secondary parameters of the coaxial cable, situated in conducting medium, are obtained.**

**Вступ.** Теорія передачі сигналів по коаксіальних лініях зв'язку досить добре розроблена. При цьому співвідношення для електричних параметрів передачі отримані для коаксіального кабелю ідеальної конструкції в непровідному середовищі [1]. При такій моделі аналізу роботи коаксіального кабелю (КК) не враховуються втрати в середовищі, в якому розташований кабель, оскільки в КК відсутнє зовнішнє електромагнітне поле.

Як було показано в [2], у КК реальної конструкції як у повітрі (непровідному середовищі), так і в провідному середовищі (наприклад, у морській воді) є зовнішнє електромагнітне поле. Це поле зумовлене як недосконалістю конструкції (ексцентриситет провідників КК, несучільна зовнішня оболонка-екран, яка може бути у вигляді сітківки або суцільного циліндричного екрана з поздовжнім або гвинтовим швом), так і струмами розтікання в провідному середовищі (за рахунок струмів у екрані КК). У діапазоні частот  $10^4 \div 10^6$  Гц для кабелю, розташованого в провідному середовищі, переважає електромагнітне поле, яке зумовлене протіканням частини струмів зовнішнього провідника КК (екрана) по зовнішньому середовищу, яке оточує кабель.

У цій роботі проаналізовано вплив зовнішнього провідного середовища на електричні параметри КК ідеальної конструкції.

Отримані раніше в [2,3] аналітичні залежності для радіальної магнітної  $H_\rho$ , тангенціальної магнітної  $H_\varphi$  і поздовжньої електричної  $E_z$  компонент зовнішнього електромагнітного поля КК у провідному середовищі (наприклад, у довільній точці  $M(\rho, \varphi, z)$ ) поза межами кабелю (рисунок) дозволяють провести корекцію електричних параметрів КК, зумовлених втратами в зовнішньому середовищі, й отримати нові розрахункові співвідношення для параметрів передачі КК зв'язку.

**Електричні параметри КК у провідному середовищі.** Електричні параметри КК діляться на первинні і вторинні [1]. До первинних параметрів належать комплексний погонний опір  $Z = r + j\omega L$  і погонна провідність  $Y = g + j\omega C$ . До вторинних належать хвильовий опір КК  $Z_x$  і стала поширення  $\gamma$ .

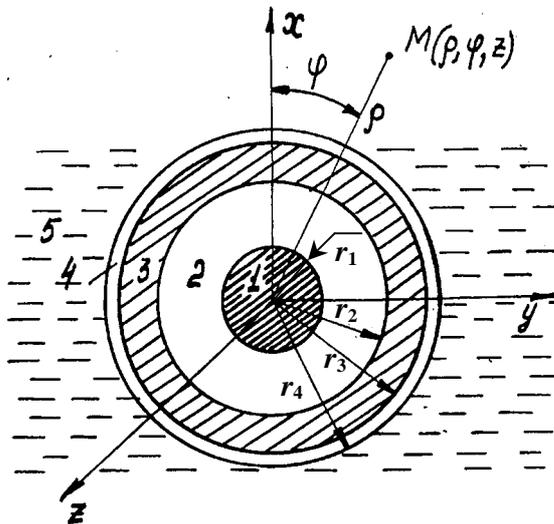
Для отримання розрахункових співвідношень для електричних параметрів КК у провідному середовищі спиратимемося на методику, яку використовували в [1]. При цьому приймаємо, що зворотний струм у кабелі протікає як по екрані, так і по провідному середовищі, що оточує КК. Під впливом «відсмоктуючої» дії зовнішнього середовища змінюється погонний опір зовнішнього провідника КК  $Z_3$ , стала поширення  $\gamma$  і хвильовий опір  $Z_x$  коаксіального кабелю. Погонна провідність КК  $Y$ , яка визначається провідністю діелектрика і ємністю кабелю, вважається незмінною.

Для розв'язання сформульованої задачі необхідно знайти розподіл електромагнітного поля у діелектрику КК (середовище 2 на рисунку) з урахуванням параметрів зовнішнього провідного середовища – 5. З цією метою, аналогічно [2], розглянута гранична задача електродинаміки для однорідної по довжині багатосарової циліндричної структури. При цьому прийнято, що електродинамічні параметри матеріалу центрального й зовнішнього провідників КК однакові, а також не беруться до уваги струми зміщення в провідниках кабелю, діелектрику й зовнішньому середовищі. Магнітна проникність у всіх середовищах (1 – 5) прийнята такою, що дорівнює  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Погонний опір зовнішнього провідника КК можна визначити як

$$Z_3 = E_Z / I, \quad (1)$$

де  $E_Z$  – поздовжня складова напруженості електричного поля на внутрішній поверхні зовнішнього провідника (екрана) КК,  $I$  – струм у кабелі.



Коаксіальний кабель у провідному середовищі (1 – центральний провідник КК з радіусом  $r_1$ ; 2 – діелектричне заповнення КК з зовнішнім радіусом  $r_2$ ; 3 – зовнішній провідник КК (екран) з зовнішнім радіусом  $r_3$ ; 4 – ізоляційне покриття КК з зовнішнім радіусом  $r_4$ ; 5 – зовнішнє провідне середовище).

Поле  $E_Z$  визначається після розв'язання системи рівнянь, отриманих з граничних умов для поздовжньої  $E_Z$  і тангенціальної  $H_\phi$  компонент поля на поверхні зовнішнього провідника КК (при  $r = r_2$  і  $r = r_3$ ). При цьому отримано

$$Z_3 = \frac{\sqrt{jk_1}}{2\pi r_2 \sigma_1} \left[ \frac{J_0(\sqrt{jk_1} r_2)}{J_1(\sqrt{jk_1} r_2) + H_1(\sqrt{jk_1} r_2)} \cdot \frac{N - H_1(\sqrt{jk_5} r_3) I_0(\sqrt{jk_1} r_3)}{H_1(\sqrt{jk_5} r_3) H_0(\sqrt{jk_1} r_3) - M} \right]$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{H_0(\sqrt{jk_1r_2})}{H_0(\sqrt{jk_1r_2}) + J_1(\sqrt{jk_1r_2}) \cdot \frac{H_1(\sqrt{jk_5r_3})H_0(\sqrt{jk_1r_3}) - M}{N - H_1(\sqrt{jk_5r_3})J_0(\sqrt{jk_1r_3})}} \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

де  $N = \frac{k_5\sigma_1}{k_1\sigma_5} J_1(\sqrt{jk_1r_3})H_0(\sqrt{jk_5r_3})$ ;  $M = \frac{k_5\sigma_1}{k_1\sigma_5} H_1(\sqrt{jk_1r_3})H_0(\sqrt{jk_5r_3})$ ;  $\sigma_1, \sigma_5$  – електропровідності кабелю й середовища;  $k_1 = \sqrt{\omega\mu_0\sigma_1}$ ,  $k_5 = \sqrt{\omega\mu_0\sigma_5}$  – хвильові числа провідників кабелю і зовнішнього середовища;  $J_0, J_1, H_0, H_1$  – функції Бесселя. Індeksi хвильових чисел окремих середовищ відповідають номерам цих середовищ на рисунку.

Використовуючи асимптотичні розклади для бесселевих функцій з великим аргументом і наближені формули для цих функцій з малим аргументом, можна отримати з виразу (2) погонні параметри зовнішнього провідника КК з урахуванням впливу зовнішнього середовища

$$R'_3 = R_3K_R, \quad L'_3 = L_3K_L; \quad (3)$$

де  $R_3, L_3$  – відомі з літератури погонні опір та індуктивність;  $K_R, K_L$  – відповідні поправкові коефіцієнти, які враховують вплив провідного середовища.

Поправкові коефіцієнти при цьому визначають такими співвідношеннями:

$$K_R = \frac{1-x-x_1}{(1-x)^2+x_1^2} + \frac{1-y+y_1}{(1-y)^2+y_1^2}, \quad K_L = \frac{1-x+x_1}{(1-x)^2+x_1^2} + \frac{1-y-y_1}{(1-y)^2+y_1^2}, \quad (4)$$

де  $x = e^u (A \cos u - B \sin u)$ ,  $x_1 = e^{-u} (B \cos u + A \sin u)$ ,  $y = e^u (n \cos u - m \sin u)$ ,  
 $y_1 = e^{-u} (m \cos u + n \sin u)$ ,  $A = \frac{a^2 + c^2 - 2b^2}{(a-b)^2 + (c+b)^2}$ ,  $B = \frac{2b(a+c)}{(a-b)^2 + (c+b)^2}$ ,  $n = \frac{a^2 + c^2 - 2b^2}{(a+b)^2 + (c-b)^2}$ ,  
 $m = \frac{2b(a+c)}{(a+b)^2 + (c-b)^2}$ ,  $a = 0,5 \frac{k_5\sigma_1}{k_1\sigma_5}$ ,  $b = \frac{\sqrt{2}}{\pi k_5 r_3}$ ,  $c = \frac{2}{\pi} \ln \frac{0,58 k_5 r_3}{2} \cdot \frac{k_5\sigma_1}{\sigma_5 k_1}$ ,  $u = \sqrt{2} k_1 (r_3 - r_2)$ .

Для КК, розташованого в непровідному середовищі, при  $u \geq 5$   $K_R = K_L = 1$  і ми приходимо до формул погонних параметрів зовнішнього провідника КК  $R_3$  і  $L_3$ , які широко використовують в літературі [1].

Зміна параметрів зовнішнього провідника КК впливає на значення таких його параметрів як стала поширення  $\gamma$  і хвильовий опір  $Z_x$ , від яких залежить якість зв'язку.

Не наводячи досить громіздких виразів для  $\gamma$  і  $Z_x$ , відзначимо тільки, що провідне середовище має помітний вплив тільки на коефіцієнт поширення  $\gamma$  в неізолюваному від середовища КК [2], тобто в КК, у якого екран не має зовнішньої ізолюючої оболонки і контактує по всій довжині з провідним середовищем.

Вплив провідного середовища на хвильовий опір можна визначити з виразу

$$Z'_x = \gamma' / Y; \quad (5)$$

де  $Z'_x, \gamma'$  – відкоректовані з урахуванням провідного середовища значення  $Z_x$  і  $\gamma$ .

Остаточний вираз для хвильового опору КК в провідному середовищі визначається як

$$Z'_x = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \cdot \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi} \cdot \left( 1 + \frac{\frac{1}{r_1} + \frac{a_1 - b_1}{r_2}}{2\sqrt{2}k_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} + j \frac{\frac{1}{r_1} + \frac{a_1 + b_1}{r_2}}{2\sqrt{2}k_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \right), \quad (6)$$

де  $a_1 = \frac{e^{2x} - \lambda^2 e^{-2x}}{e^{2x} + \lambda^2 e^{-2x} - 2\lambda \cos 2x}$ ,  $b_1 = \frac{2\lambda \sin 2x}{e^{2x} + \lambda^2 e^{-2x} - 2\lambda \cos 2x}$ ,  $x = \frac{\sqrt{2}}{2} k_1 (r_3 - r_2)$ ,

$$\lambda = \frac{C + j \left\{ D + \frac{k_1}{\sigma_1} \left[ \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \frac{\ln \frac{r_3}{r_4} - 1}{\ln \frac{r_2}{r_1} r_3} \right] \right\}}{C + j \left\{ D + \frac{k_1}{\sigma_1} \left[ \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \frac{\ln \frac{r_3}{r_4} + 1}{\ln \frac{r_2}{r_1} r_3} \right] \right\}}, \quad C = \frac{\omega \mu_0}{\sqrt{2}} \left( \ln \frac{2}{\Gamma k_5 r_4} - \frac{\pi}{4} \right), \quad D = \frac{\omega \mu_0}{\sqrt{2}} \left( \ln \frac{2}{\Gamma k_5 r_4} + \frac{\pi}{4} \right),$$

$$\Gamma = 1,781, \quad \varepsilon = \varepsilon_2 = \varepsilon_4.$$

**Результати числових розрахунків.** Результати розрахунків зміни електричних параметрів КК у середовищі з провідністю порядку  $1 \div 4$  См/м показали, що ці зміни становлять десяті частки відсотка на частотах  $1 \div 10$  МГц і тільки на частотах, менших від 1 МГц можливі зміни параметрів можуть становити одиниці відсотків. З літератури відомо, що в останньому випадку це може перевищити допуски на стабільність електричних параметрів ліній зв'язку на основі КК.

**Висновки.** Числовий аналіз наведених залежностей показує, що в діапазоні частот, які вищі від 1 МГц, зміна електричних параметрів коаксіальних ліній зв'язку від параметрів середовища, в якому вони розташовані, є несуттєвою. Практично вплив провідного середовища може бути відчутним лише на частотах, які менші від 30 кГц.

1. Гроднев И.И., Фролов А.А. Коаксиальные кабели связи. М., 1977. 2. Дикмарова Л.П., Ничога В.А. Особенности паразитных излучений коаксиальных линий связи // Материалы междунар. научн.-техн. конф. "Защита-97", Київ, 23-26 грудня 1997. С. 130-135. 3. Dikmarova L., Nichoga V. Electromagnetic Shielding of Coaxial Long Line in Various Environments // Proceed. Int. Conf. ICEAA 97, Sept. 15-18, Torino, Italy, 1997. Vol.I, P.275-277.