

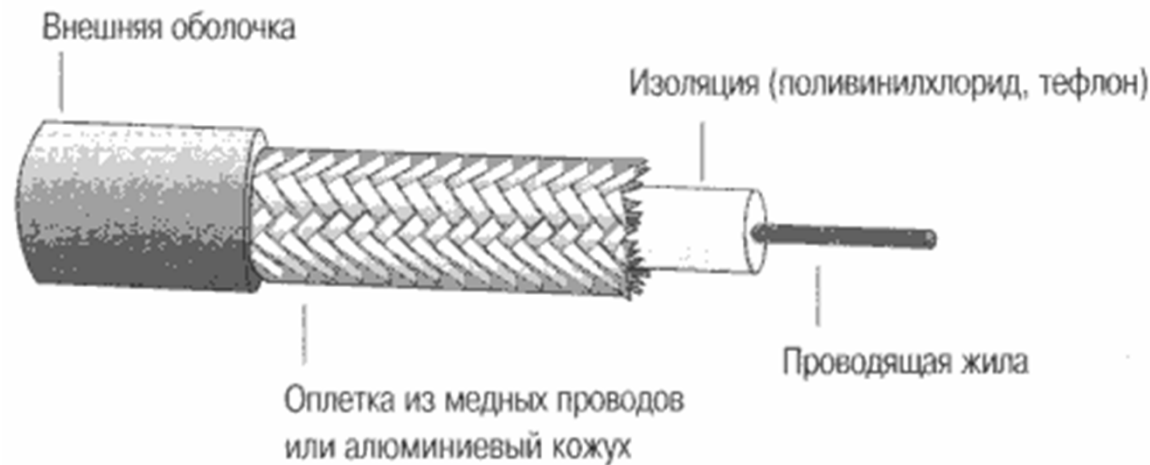
**МЕТОДИКА РАСЧЕТА
ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНОГО
КАБЕЛЯ В ШИРОКОМ
ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

Митрохин В.Е., д.т.н., «ОмГУПС»

Занкин С.Н., АО «ОНИИП»

Не так давно **коаксиальный кабель** был самым распространенным типом кабеля. Это объяснялось двумя причинами.

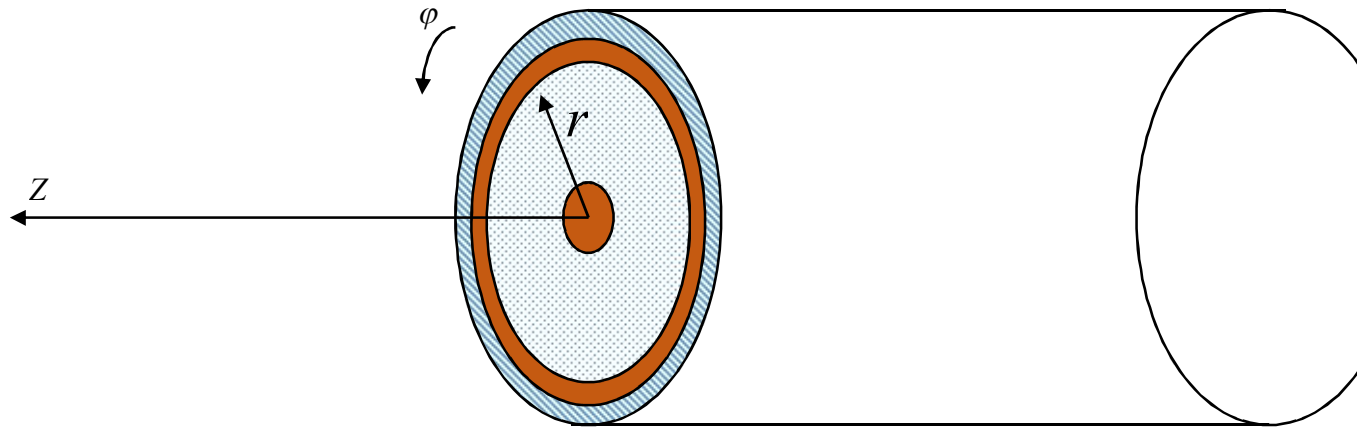
- Во-первых, он был относительно недорогим, легким, гибким и удобным в применении.
- А во-вторых, широкая популярность **коаксиального кабеля** привела к тому, что он стал безопасным и простым в установке.



- **Коаксиальный кабель** более помехоустойчив, затухание сигнала в нем меньше чем в витой паре. Затухание (attenuation) - это уменьшение величины сигнала при его перемещении по кабелю. Затухание сигнала приводит к ухудшению его качества.
- Экран поглощает внешние электромагнитные сигналы, не позволяя им влиять на передаваемые по жиле данные, поэтому коаксиальный кабель можно использовать при передаче на сравнительно большие расстояния и в тех случаях, когда высокоскоростная передача данных осуществляется на несложном оборудовании.

Условия передачи электрических сигналов по коаксиальному кабелю определяются электромагнитным полем в нем, которое описывается уравнениями Максвелла.

Для решения уравнений выбирают цилиндрическую систему координат, считают изменение во времени напряженностей электрического и магнитного полей гармоническим (изменение электромагнитного поля не зависит от φ , и составляющие H_z , E и радиальная H_r отсутствуют).



Так электромагнитное поле коаксиальной кабельной конструкции в системе цилиндрических координат полностью определяется уравнениями:

$$\frac{\partial H_{\varphi}}{\partial r} + \frac{H_{\varphi}}{r} = E_z \left(\frac{1}{\rho} + i\omega\varepsilon \right)$$

$$-\frac{\partial H_{\varphi}}{\partial z} = E_r \left(\frac{1}{\rho} + i\omega\varepsilon \right)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -i\omega\mu H_{\varphi}$$

Из уравнений следует, что напряженность магнитного поля содержит только составляющую H_{φ} , т.е. линии магнитной индукции располагаются концентрически вокруг оси Oz.

Электрическое поле характеризуется двумя составляющими:

- ✓ радиальной E_r (обуславливает собой наличие тока смещения в диэлектрике и совпадает по направлению с вектором его плотности)
- ✓ осевой E_z (вызывающей ток проводимости в проводниках кабеля).

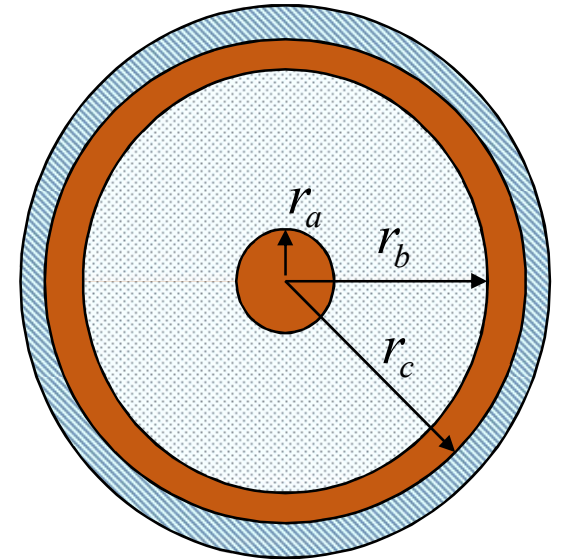
Электромагнитное поле снаружи внешнего проводника коаксиального кабеля отсутствует (силовые линии электрического поля замыкаются между противоположными зарядами, располагающимися на внешней поверхности внутреннего провода (одного знака) и на внутренней поверхности внешнего провода (обратного знака)).

Так как токи во внутреннем и внешнем проводниках противоположны по направлению и равны по величине, то суммарный магнитный поток снаружи внешнего проводника равен 0.

Полное комплексное сопротивление внутреннего проводника Z_a , отнесенное к единице длины, определяется как отношение напряженности продольного электрического поля E_z , взятой на поверхности внутреннего проводника (при $r=r_a$), к полному току в этом проводнике I

$$Z_a = R_a + i\omega L_a = \frac{E_z}{I} = \frac{\rho_a}{\pi r_a^2} \frac{\sqrt{i\Gamma_a r_a} I_0(\sqrt{i\Gamma_a r_a})}{2 I_1(\sqrt{i\Gamma_a r_a})}$$

$$\Gamma_a = \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\rho_a}}$$



$I_0(z), I_1(z)$ - видоизмененные функции Бесселя

μ_a – удельная магнитная проницаемость внутреннего проводника

ρ_a – удельное сопротивление внутреннего проводника

- Для определения полного сопротивления внешнего проводника коаксиального кабеля рассматривают проникновение в этот проводник цилиндрической электромагнитной волны через внутреннюю поверхность, так как заряды располагаются на внутренней поверхности проводника. При этом продольная составляющая E_z напряженности электрического поля имеет наибольшее значение на внутренней поверхности внешнего проводника.

- Тогда

$$Z_b = R_b + i\omega L_b = \frac{E_z(r_b)}{I}$$

- Напряженность электрического поля задается выражением:

$$E_z = AI_0 \left(\sqrt{i\Gamma_b} r \right) + BK_0 \left(\sqrt{i\Gamma_b} r \right)$$

• Коэффициенты А и В находятся с учетом того, что

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = i\omega\mu H_\varphi$$

так как заряды внутри проводника существовать не могут ($E_r = 0$).

Составляющая напряженности магнитного поля на внутренней поверхности внешнего проводника удовлетворяет закону полного тока

$$H_\varphi = \frac{I}{2\pi r_b}$$

а на внешней его поверхности равна 0.

$$\frac{\sqrt{i}\Gamma_b}{i\omega\mu_b} \left(AI_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_b) + BK_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_b) \right) = \frac{I}{2\pi r_b},$$

$$\frac{\sqrt{i}\Gamma_b}{i\omega\mu_b} \left(AI_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_c) + BK_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_c) \right) = 0.$$

- Из решения этих уравнений получают значения постоянных интегрирования и получают выражение напряженности электрического поля на внутренней поверхности внешнего проводника

$$E_z = \frac{\sqrt{i}\Gamma_b \rho_b I}{2\pi r_b} \cdot \frac{I_0(\sqrt{i}\Gamma_b r_b)K_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_c) + K_0(\sqrt{i}\Gamma_b r_b)I_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_c)}{I_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_c)K_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_b) - K_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_c)I_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_b)}$$

- Знак минус у E_z показывает, что ток во внешнем проводнике течет в противоположную сторону относительно тока во внутреннем проводнике.
- Величина полного сопротивления проводника:

$$Z_b = \frac{\sqrt{i}\Gamma_b \rho_b}{2\pi r_b} \cdot \frac{I_0(\sqrt{i}\Gamma_b r_b)K_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_c) + K_0(\sqrt{i}\Gamma_b r_b)I_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_c)}{I_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_c)K_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_b) - K_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_c)I_1(\sqrt{i}\Gamma_b r_b)}$$

- Вычислительные возможности программ математического моделирования, например таких как Mathcad, MatLab, не позволяют вычислять значения видоизмененных функций Бесселя для частот выше 1 ГГц; в связи с этим достаточно точное приближение получается при замене самих функций первыми двумя членами их разложения в асимптотические ряды. Тогда полные комплексные сопротивления можно вычислить по следующим формулам ($t=r_c-r_b$ - толщина внешнего проводника):

$$Z_a = \frac{\sqrt{i}}{r_a} \sqrt{\frac{\rho_a \mu_a f}{2\pi}} + \frac{\rho_a}{4\pi r_a^2}$$

$$Z_b = \frac{\sqrt{i}\Gamma_b\rho_b}{2\pi r_b} \left(\operatorname{cth}(\sqrt{i}\Gamma_b t) - \frac{1}{8\sqrt{i}\Gamma_b} \left(\frac{3}{r_c} + \frac{1}{r_b} \right) \right)$$

Полное сопротивление кабеля на единицу длины (метр):

$$Z = R + i\omega L = R_a + R_b + i\omega(L_a + L_b + L_{\text{вн}})$$

где

$$L_{\text{вн}} = \frac{\mu_0}{2\pi I} \int_{r_a}^{r_b} I \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_b}{r_a}$$

при расчете учитывается междупроводниковая индуктивность, зависящая от магнитного потока в пространстве между проводниками.

- Магнитное поле в диэлектрике коаксиальной цепи создается только током, протекающим во внутреннем проводнике. Получим значение полной проводимости изоляции коаксиальной цепи:

$$Y = G + i\omega C = \frac{2\pi \left(\frac{1}{\rho_{\partial}} + i\omega\varepsilon_{\partial} \right)}{\ln \frac{r_b}{r_a}}$$

- Коэффициент распространения определяется формулой:

$$\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}$$

- где α - коэффициент затухания; β - коэффициент фазы.

Выполним расчет параметров радиочастотного кабеля РК-50-3-14 по следующим данным:

- $r_a=0,87$ мм – радиус внутреннего проводника;
- $r_b=2,95$ мм – внутренний радиус внешнего проводника;
- $r_c=3,45$ мм – внешний радиус внешнего проводника;

$\rho = 0,0175 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$ - удельное сопротивление меди;

$\mu_a = \mu_b = 1$ - удельная магнитная проницаемость меди;

$\rho_{\partial} = 10^{16} \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$ - удельное сопротивление полиэтиленовой изоляции;

$\varepsilon_r = 2,25$ - относительная диэлектрическая проницаемость полиэтилена.

| $f, \text{МГц}$ | $R(f), \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$ | $L(f) \cdot 10^{-7}, \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ | $\beta(f), \frac{\text{рад}}{\text{м}}$ | $\alpha(f), \frac{\text{неп}}{\text{км}}$ | $Z(f), \text{Ом}$ | $Z'(f), \text{Ом}$ |
|-----------------|------------------------------------|--|---|---|-------------------|--------------------|
| 1,0 | 0,064 | 2,541 | 0,032 | 0,649 | 49,843 | 49,816 |
| 2,0 | 0,09 | 2,512 | 0,064 | 0,919 | 49,548 | 49,517 |
| 3,0 | 0,11 | 2,499 | 0,095 | 1,128 | 49,418 | 49,385 |
| 4,0 | 0,126 | 2,492 | 0,127 | 1,305 | 49,341 | 49,307 |
| 5,0 | 0,141 | 2,486 | 0,159 | 1,461 | 49,288 | 49,254 |
| 6,0 | 0,154 | 2,483 | 0,19 | 1,604 | 49,249 | 49,215 |
| 7,0 | 0,166 | 2,48 | 0,222 | 1,735 | 49,219 | 49,185 |
| 8,0 | 0,178 | 2,477 | 0,253 | 1,858 | 49,194 | 49,160 |
| 9,0 | 0,188 | 2,475 | 0,285 | 1,974 | 49,174 | 49,140 |
| 10,0 | 0,199 | 2,473 | 0,316 | 2,083 | 49,157 | 49,123 |
| 20,0 | 0,28 | 2,464 | 0,631 | 2,981 | 49,065 | 49,031 |
| 30,0 | 0,343 | 2,46 | 0,946 | 3,685 | 49,024 | 48,990 |
| 40,0 | 0,395 | 2,458 | 1,261 | 4,288 | 49,0 | 48,965 |
| 50,0 | 0,442 | 2,456 | 1,575 | 4,827 | 48,983 | 48,949 |
| 60,0 | 0,484 | 2,455 | 1,89 | 5,32 | 48,971 | 48,937 |
| 70,0 | 0,523 | 2,454 | 2,204 | 5,778 | 48,961 | 48,927 |
| 80,0 | 0,559 | 2,453 | 2,519 | 6,209 | 48,953 | 48,920 |
| 90,0 | 0,592 | 2,453 | 2,833 | 6,618 | 48,947 | 48,913 |
| 100,0 | 0,624 | 2,452 | 3,148 | 7,008 | 48,942 | 48,908 |

| $f, \text{ МГц}$ | $R(f), \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$ | $L(f) \cdot 10^{-7}, \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ | $\beta(f), \frac{\text{рад}}{\text{м}}$ | $\alpha(f), \frac{\text{неп}}{\text{км}}$ | $Z(f), \text{ Ом}$ | $Z'(f), \text{ Ом}$ |
|------------------|------------------------------------|--|---|---|--------------------|---------------------|
| 100,0 | 0,624 | 2,452 | 3,148 | 7,008 | 48,942 | 48,908 |
| 200,0 | 0,882 | 2,452 | 6,292 | 10,000 | 48,913 | 48,879 |
| 300,0 | 1,08 | 2,449 | 9,436 | 13,000 | 48,9 | 48,866 |
| 400,0 | 1,247 | 2,448 | 12,579 | 15,000 | 48,892 | 48,858 |
| 500,0 | 1,394 | 2,447 | 15,722 | 17,000 | 48,887 | 48,853 |
| 600,0 | 1,527 | 2,447 | 18,865 | 19,000 | 48,883 | 48,849 |
| 700,0 | 1,649 | 2,446 | 22,008 | 21,000 | 48,88 | 48,846 |
| 800,0 | 1,763 | 2,446 | 25,151 | 23,000 | 48,878 | 48,844 |
| 900,0 | 1,87 | 2,445 | 28,293 | 25,000 | 48,876 | 48,842 |
| 1000,0 | 1,971 | 2,445 | 31,436 | 26,000 | 48,874 | 48,840 |
| 2000,0 | 2,786 | 2,444 | 62,86 | 41,000 | 48,865 | 48,831 |
| 3000,0 | 3,412 | 2,444 | 94,283 | 54,000 | 48,861 | 48,827 |
| 4000,0 | 3,94 | 2,444 | 125,704 | 65,000 | 48,858 | 48,825 |
| 5000,0 | 4,404 | 2,444 | 157,125 | 77,000 | 48,857 | 48,823 |

- Столбец значений $Z'(f)$ получен с помощью программы Coaxial Cable Calculator.
- Как видно из таблицы, значения волновых сопротивлений, полученные с помощью предложенной методики $Z(f)$ и с помощью Калькулятора расчета параметров коаксиального кабеля $Z'(f)$, отличаются не более чем на 0,1%.
- Современные системы связи должны обеспечивать высокую скорость передачи данных в том числе по медным кабелям благодаря применению сигналов высокой частоты (более 1 ГГц). Расчет параметров кабеля в широком спектре частот позволяет решить вопрос о возможности применения данного кабеля и допустимых длинах кабельных линий. Предложенная методика позволяет решить обозначенные выше задачи.

Благодарю за внимание!