

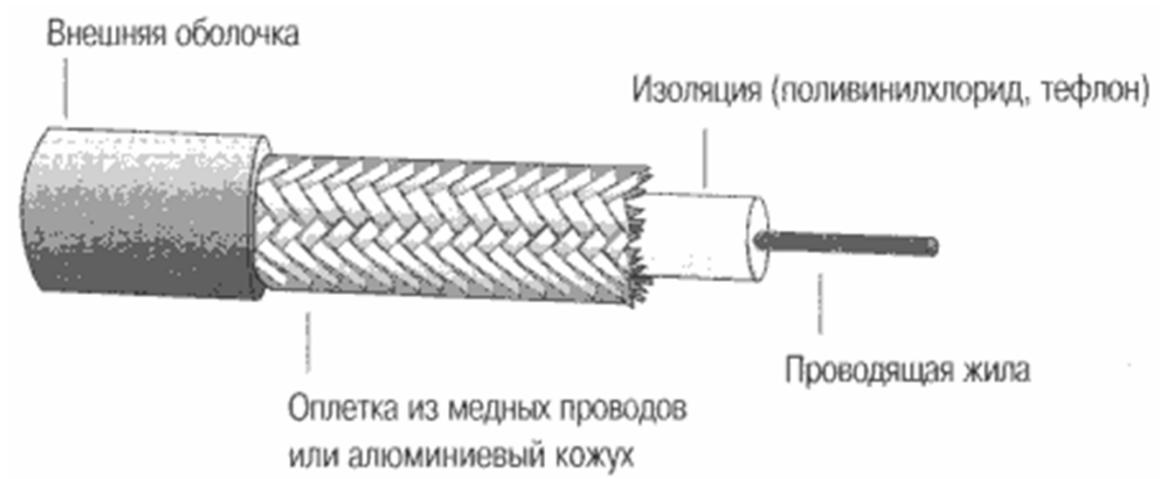
**МЕТОДИКА РАСЧЕТА
ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНОГО
КАБЕЛЯ В ШИРОКОМ
ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

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.

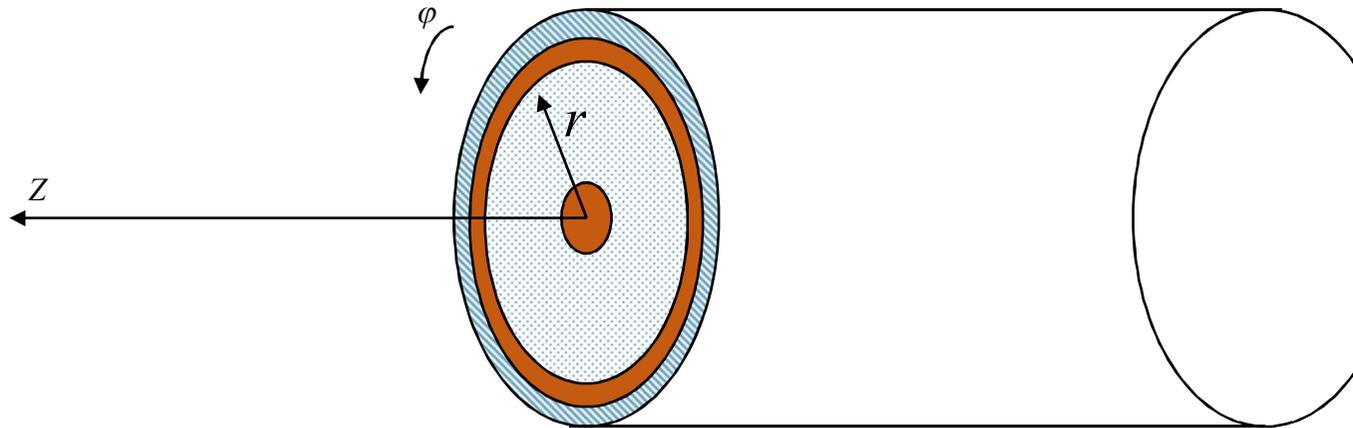
- Во-первых, он был относительно недорогим, легким, гибким и удобным в применении.
- А во-вторых, широкая популярность **коаксиального кабеля** привела к тому, что он стал безопасным и простым в установке.



- **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).

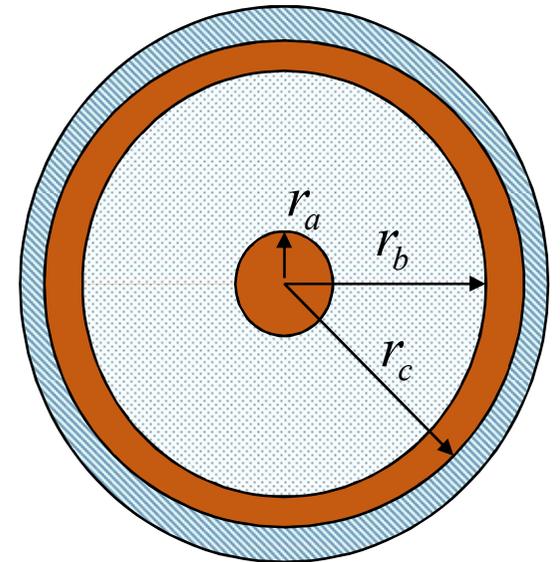
Электромагнитное поле снаружи внешнего проводника коаксиального кабеля отсутствует (силовые линии электрического поля замыкаются между противоположными зарядами, располагающимися на внешней поверхности внутреннего провода (одного знака) и на внутренней поверхности внешнего провода (обратного знака)).

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

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

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



$I_0(z), I_1(z)$ - 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!