



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Радиоэлектроника»

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ** к проведению практических занятий по дисциплине

## **«Направляющие среды электросвязи»**

Авторы

Шокова Ю. А.

Звездина М.Ю.

Ростов-на-Дону, 2016

## Аннотация

Методические указания предназначены для проведения практических занятий со студентами всех форм обучения по специальности 11.03.02.

## Авторы



к.ф.-м.н.,  
доцент кафедры  
«Радиоэлектроника»

Шокова Юлия  
Александровна



д.ф.-м.н., доцент,  
зав. кафедрой  
«Радиоэлектроника»

Звездина Марина  
Юрьевна



## Оглавление

<b>Симметричные кабели связи.....</b>	<b>4</b>
1 Элементы конструкции симметричных кабелей связи ...	4
2 Первичные параметры передачи .....	5
3 Первичные параметры передачи воздушных линий.....	7
4 Вторичные параметры передачи симметричных кабелей и воздушных линий.....	8
<b>Коаксиальные кабели связи.....</b>	<b>11</b>
1 Первичные параметры передачи .....	11
2 Вторичные параметры передачи.....	14
3 Влияние соотношения размеров проводников на параметры передачи .....	15
<b>Оптические кабели.....</b>	<b>17</b>
1 Нагрузка на растяжение .....	17
2 Основные параметры.....	17
3 Затухание .....	18
4 Дисперсия.....	20
<b>Литература.....</b>	<b>22</b>

## СИММЕТРИЧНЫЕ КАБЕЛИ СВЯЗИ

### 1 Элементы конструкции симметричных кабелей связи

При повивной скрутке кабельного сердечника длина изолированных проводников второго, третьего и так далее повивов увеличивается по сравнению с длиной самого кабеля. Отношение длины проводников в повиве к длине кабеля задает коэффициент укрутки, который вычисляется по формуле:

$$\chi = \sqrt{1 + \pi^2 \left( \frac{D}{h} \right)^2}, \quad (1.1)$$

где  $D$  – средний диаметр кабельной скрутки, мм;  
 $h$  – шаг скрутки, мм.

Под средним диаметром кабельной скрутки понимается диаметр окружности, проведенный через центры сечения групп соответствующих повивов, как показано на рисунке 1.1.

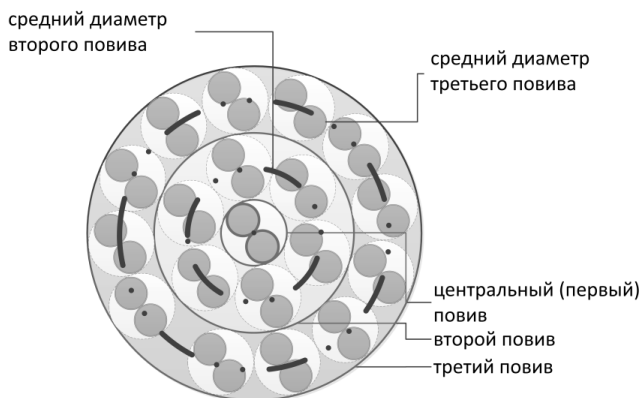


Рисунок 1.1

Диаметр центрального повива, если в нем от 2 до 5 пар, вычисляется по формуле:

$$D = d \left[ 1 + \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \right], \text{ мм} \quad (1.2)$$

## Направляющие среды электросвязи

где  $d$  – диаметр группы, мм;

$n$  (от 2 до 5) – число групп в центральном повиве.

Число пар в повивах определяется по следующей эмпирической формуле

- если в центральном повиве две и более пары:

$$m' \approx m + 6;$$

- если в центральном повиве одна пара, то число пар во втором повиве:

$$m' \approx m + 5;$$

в остальных повивах:

$$m' \approx m + 6,$$

где  $m$  – число пар в предыдущем повиве.

Если изоляция проводников воздушно-бумажная, при ее скрутке происходит деформация проводников, в результате чего на практике размеры скрученных групп становятся меньше расчетных. В этом случае рассчитываются эффективные диаметры групп.

Скрутка	Парная	Звездная	Двойная парная	Двойная звездная	Восьмерочная
Эффективный диаметр	$0,965 d_n$	$0,909 d_z$	$0,956 d_{он}$	$0,980 d_{оз}$	$0,983 d_8$

## 2 Первичные параметры передачи

2.1 Активное сопротивление симметричной цепи переменному току, Ом/км:

$$R = 2R_0 \chi \left[ 1 + F(kr) + \frac{pG(kr)(d/a)^2}{1 - H(kr)(d/a)^2} \right] + R_m, \quad (2.1)$$

где  $R_0$  – электрическое сопротивление цепи постоянному току, Ом/км;

$\chi$  – коэффициент укрутки;

$F$  – коэффициент учета потерь в проводнике вследствие поверхностного эффекта;

$p$  – коэффициент учета потерь в проводниках второй пары одной четверки ( $p=1$  для парной скрутки,  $p=5$  для звездной,  $p=2$

## Направляющие среды электросвязи

для двойной парной);

$G$  – коэффициент учета потерь в проводнике вследствие эффекта близости;

$d$  – диаметр голого проводника, мм;

$H$  – коэффициент учета потерь в проводнике вследствие повторного действия эффекта близости;

$k$  – коэффициент вихревых токов,  $\text{мм}^{-1}$ ;

$r$  – радиус голого проводника, мм;

$R_M$  – дополнительное сопротивление вследствие потерь на вихревые токи в окружающих металлических массах.

Коэффициенты  $F$ ,  $G$  и  $H$  задаются таблично.

Электрическое сопротивление цепи постоянному току, Ом/км:

$$R_0 = \rho \frac{4l}{\pi d^2} = \frac{4000\rho}{\pi d^2}, \quad (2.2)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление металла проводника, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  
 $l$  – длина проводника, км.

$R_M$  на частотах 200 кГц задано таблично. Пересчет на другие частоты

$$R_M = R_{M200} \sqrt{\frac{f[\text{кГц}]}{200}}. \quad (2.3)$$

Для низких частот ( $f < 60$  кГц) вместо формулы (2.1) расчет проводится по формуле

$$R = 2R_0\chi[1 + F(kr)] + R_M. \quad (2.4)$$

Сопротивление проводов при температуре  $t$ , отличной от 20°C, рассчитывается по формуле

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha_R(t - 20)]. \quad (2.5)$$

Температурные коэффициенты сопротивления  $\alpha_R$  задаются таблично.

### 2.2 Индуктивность цепи, Гн/км:

$$L = L_{\text{вн}} + 2L_a = \chi \left[ 4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4}, \quad (2.6)$$

где  $L_{\text{вн}}$  – внешняя межпроводниковая индуктивность;

$L_a$  – индуктивность одного из проводников;

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;

$Q$  – коэффициент, учитывающий вытеснение магнитного поля из проводника вследствие поверхностного эффекта; задается таблично.

## Направляющие среды электросвязи

2.3 Емкость идеальной цепи, Ф/км:

$$C = \frac{\pi \varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{a-r}{r}}, \quad (2.7)$$

где  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость;

$a$  – расстояние между центрами пары, мм.

Емкость реальной цепи, Ф/км:

$$C = \frac{\chi \varepsilon_r 10^{-6}}{36 \ln \left[ \frac{a \psi}{r} \right]}, \quad (2.8)$$

где  $\psi$  – поправочный коэффициент, характеризующий близость металлических элементов, равный:

- для парной скрутки:

$$\Psi_n = \frac{(d_n + d_1 - d)^2 - a^2}{(d_n + d_1 - d)^2 + a^2}, \quad (2.9)$$

- для звездной скрутки:

$$\Psi_3 = \frac{(d_3 + d_1 - d)^2 - a^2}{(d_3 + d_1 - d)^2 + a^2}. \quad (2.10)$$

Здесь  $d_n$ ,  $d_3$  – диаметры соответствующих групп.

2.4 Проводимость изоляции, См/км:

$$G = G_0 + G_f = \frac{1}{R_{из}} + \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (2.11)$$

где  $G_0$  – проводимость изоляции по постоянному току;

$G_1$  – проводимость изоляции по переменному току;

$R_{из}$  – сопротивление изоляции кабельной цепи. Нормировано величиной 10 000 МОм·км для междугородних кабелей и 2 000 МОм·км для городских;

$\omega$  – круговая частота ( $\omega = 2\pi f$ );

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции.

## 3 Первичные параметры передачи воздушных линий

При расчете первичных параметров передачи воздушных линий следует учесть, что у них большое расстояние между проводами, т.е.  $a/r \approx 50$  и нет заметного искажения электромагнитного поля за счет взаимодействия полей проводов, не возникает эффекта близости.

## Направляющие среды электросвязи

3.1.1 Активное сопротивление симметричной цепи переменному току, Ом/км:

$$R = 2R_0[1 + F(kr)]. \quad (3.1)$$

3.1.2 Индуктивность цепи, Гн/км:

$$L = \left[ 4 \ln \frac{a}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4}. \quad (3.2)$$

3.1.3 Емкость, Ф/км:

$$C = \frac{10^{-6}}{36 \ln \frac{a}{r}}. \quad (3.3)$$

3.1.4 Проводимость изоляции, См/км:

$$G = G_0 + nf, \quad (3.4)$$

где  $n$  – коэффициент, учитывающий потери в диэлектрике при переменном токе; задается таблично.

В зависимости от погоды  $G_0$  и  $n$  принимают разные значения.

## 4 Вторичные параметры передачи симметричных кабелей и воздушных линий

При расчете данных параметров для симметричной цепи вся частотная область делится на несколько подобластей. В зависимости от области применяются различные формулы расчета параметров.

4.1 Волновое сопротивление, Ом:

- при постоянном токе ( $f=0$  Гц)

$$Z_{\text{с}} = \sqrt{\frac{R_0}{G_0}} = \sqrt{R_0 R_{\text{из}}}; \quad (4.1)$$

- в диапазоне низких частот ( $f \ll 800$  Гц)

$$Z_{\text{с}} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{2\omega C}} - i \sqrt{\frac{R - i\omega L}{2\omega C}}; \quad (4.2)$$

- в тональном диапазоне ( $f \approx 800$  Гц)

$$Z_{\text{с}} = \sqrt{\frac{R}{\omega C}} e^{-i45^\circ}; \quad (4.3)$$

- в области высоких частот ( $f \gg 40$  кГц)



## Направляющие среды электросвязи

$$Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad (4.4)$$

- на промежуточных частотах ( $800 \text{ Гц} < f < 40 \text{ кГц}$ ):

$$Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}. \quad (4.5)$$

4.2 Коэффициент затухания, Нп/км:

- при постоянном токе ( $f=0 \text{ Гц}$ )

$$\alpha = \sqrt{R_0 G_0}; \quad (4.6)$$

- в диапазоне низких частот ( $f < 800 \text{ Гц}$ )

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}(R - \omega L)}; \quad (4.7)$$

- в тональном диапазоне ( $f=800 \text{ Гц}$ )

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}}; \quad (4.8)$$

- в области высоких частот ( $f > 40 \text{ кГц}$ )

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad (4.9)$$

- на промежуточных частотах ( $800 \text{ Гц} < f < 40 \text{ кГц}$ ):

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right]}. \quad (4.10)$$

4.3 Коэффициент фазы, рад/км:

- при постоянном токе ( $f=0 \text{ Гц}$ )

$$\beta = 0; \quad (4.11)$$

- в диапазоне низких частот ( $f < 800 \text{ Гц}$ )

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}}(R + \omega L); \quad (4.12)$$

- в тональном диапазоне ( $f=800 \text{ Гц}$ )

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}}; \quad (4.13)$$

- в области высоких частот ( $f > 40 \text{ кГц}$ )

$$\beta = \omega \sqrt{LC}; \quad (4.14)$$

- на промежуточных частотах ( $800 \text{ Гц} < f < 40 \text{ кГц}$ ):

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (\omega^2 LC - RG) \right]}. \quad (4.15)$$

4.4 Скорость распростра- нения электромагнитной энер-

гии, км/с:

- при постоянном токе ( $f \approx 0$  Гц)

$$v = \frac{1}{\frac{1}{2} \sqrt{LC} \left( \sqrt{\frac{LG}{RC}} + \sqrt{\frac{RC}{LG}} \right)}; \quad (4.16)$$

- в диапазоне низких частот ( $f < 800$  Гц)

$$v = \sqrt{\frac{2\omega}{RC}}; \quad (4.17)$$

- в области высоких частот ( $f > 40$  кГц)

$$v = \sqrt{\frac{1}{LC}}; \quad (4.18)$$

- в остальных случаях ( $800 \text{ Гц} \leq f < 40 \text{ кГц}$ ):

$$v = \frac{\omega}{\beta}. \quad (4.19)$$

4.5 Комплексное число может быть представлено в двух видах

$$z = a + ib, \quad (4.20)$$

$$z = re^{i\varphi}. \quad (4.21)$$

Переход от первой ко второй формуле осуществляется по формулам:

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (4.22)$$

$$\varphi = \arctg \frac{b}{a}. \quad (4.23)$$

Деление комплексных чисел для расчета волнового сопротивления проще осуществлять, представив их в виде (4.21). В этом случае используется формула

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1 e^{i\varphi_1}}{r_2 e^{i\varphi_2}} = \frac{r_1}{r_2} e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)}. \quad (4.24)$$

Извлечение корня из числа, представленного в виде (4.21)? осуществляется по следующей формуле

$$\sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{r} e^{i\frac{\varphi}{n}} = \pm \sqrt[n]{r} e^{i\frac{\varphi}{2}}. \quad (4.25)$$

4.6 Коэффициент затухания кабельной цепи при температуре, отличной от +20°C, можно найти по формуле

$$\alpha_t = \alpha_{20} \cdot [1 + \alpha_\alpha (t - 20)]_{\partial B / \text{км}}. \quad (4.26)$$

## КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ СВЯЗИ

### 1 Первичные параметры передачи

1.1 Активное сопротивление симметричной цепи переменному току, Ом/км, при  $f \geq 60$  кГц:

$$R = \frac{\sqrt{2}}{4\pi} \left( \frac{k_a}{r_a \sigma_a} + \frac{k_b}{r_b \sigma_b} \right) = \frac{\sqrt{2}k}{2\pi} \left( \frac{k_a}{d \sigma_a} + \frac{k_b}{D \sigma_b} \right), \quad (1.1)$$

где  $k_a, k_b$  – коэффициент вихревых токов внутреннего и внешнего проводников;

$r_a, r_b$  – радиусы внутреннего и внешнего проводников, мм;

$d, D$  – диаметры внутреннего и внешнего проводников, мм;

$\sigma_a, \sigma_b$  – проводимости металлов внутреннего и внешнего проводников.

Частные случаи:

- оба проводника медные:

$$R = 0,0835 \sqrt{f} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right), \quad (1.2)$$

- оба проводника алюминиевые:

$$R = 0,108 \sqrt{f} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right), \quad (1.3)$$

- внутренний проводник медный, внешний – алюминиевый:

$$R = \sqrt{f} \left( \frac{0,0835}{d} + \frac{0,108}{D} \right). \quad (1.4)$$

В низкочастотном диапазоне ( $f < 60$  кГц) применяется полная формула

$$R = R_a + R_b, \quad (1.5)$$

где сопротивление внутреннего проводника

$$R_a = R_{0a} [1 + F(k_a r_a)], \quad (1.6)$$

а сопротивление внешнего -

$$R_b = \frac{10^3}{2\pi r_b \sigma_b} \left[ \frac{k_b}{\sqrt{2}} \frac{\operatorname{sh} u + \sin u}{\operatorname{ch} u - \cos u} - \frac{4r_b + t}{8(r_b + t)r_b} \right]. \quad (1.7)$$

где  $R_{0a}$  – электрическое сопротивление внутреннего проводника постоянному току, Ом/км, равное

$$R_{0a} = \frac{4000 \rho_a}{\pi d_a^2}; \quad (1.8)$$

$t$  – толщина внешнего проводника;

## Направляющие среды электросвязи

$r_b$  – внутренний радиус внешнего проводника;

$$u = \sqrt{2} k_b t.$$

Сопротивление постоянному току внешнего проводника толщины  $\tau$  мм, поверх которого наложен экран из  $n$  лент толщиной  $\Delta$  мм каждая, равно:

$$R_{0b} = \frac{R_M R_3}{R_M + R_3}, \quad (1.9)$$

где  $R_M$  – сопротивление внешнего медного проводника;

$R_3$  – сопротивление экрана.

При этом

$$R_M = \frac{1000 \rho_M}{\pi (D + \tau) \tau}, \quad (1.10)$$

где  $\rho_M$  – удельное сопротивление меди, Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$$R_3 = \frac{1000 \rho_3}{\pi (D + \tau + \Delta) \Delta \cdot n}. \quad (1.11)$$

**1.2 Индуктивность, Гн/км, при  $f \geq 60$  кГц:**

$$L = \left[ \frac{\sqrt{2}}{4\pi} \left( \frac{1}{r_a} \frac{\mu_{aa}}{k_a} + \frac{1}{r_b} \frac{\mu_{ab}}{k_b} \right) + 2 \ln \left( \frac{r_b}{r_a} \right) \right] \cdot 10^{-4} =$$

$$= \left[ \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left( \frac{1}{d} \frac{\mu_{aa}}{k_a} + \frac{1}{D} \frac{\mu_{ab}}{k_b} \right) + 2 \ln \left( \frac{D}{d} \right) \right] \cdot 10^{-4}, \quad (1.12)$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость проводника.

Частные случаи:

- оба проводника медные:

$$L = \left[ \frac{133,3}{\sqrt{f}} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) + 2 \ln \left( \frac{D}{d} \right) \right] \cdot 10^{-4}, \quad (1.13)$$

- оба проводника алюминиевые:

$$L = \left[ \frac{172}{\sqrt{f}} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) + 2 \ln \left( \frac{D}{d} \right) \right] \cdot 10^{-4}, \quad (1.14)$$

- внутренний проводник медный, внешний – алюминиевый:

$$L = \left[ \left( \frac{133,3}{\sqrt{f}d} + \frac{172}{\sqrt{f}D} \right) + 2 \ln \left( \frac{D}{d} \right) \right] \cdot 10^{-4}. \quad (1.15)$$

В низкочастотном диапазоне ( $f < 60$  кГц) применяется полная формула

## Направляющие среды электросвязи

$$L = L_a + L_b + L_{\text{вн}}, \quad (1.16)$$

где индуктивность внутреннего проводника

$$L_a = \frac{1}{2} \mu_r Q(kr) \cdot 10^{-4}, \quad (1.17)$$

индуктивность внешнего -

$$L_{\delta} = \frac{10^3}{2\pi r_b \sigma} \frac{k_b}{\sqrt{2\omega}} \frac{\text{sh} u - \sin u}{\text{ch} u - \cos u}, \quad (1.18)$$

а внешняя межпроводниковая индуктивность -

$$L_{\text{вн}} = 2\mu_r \ln \frac{r_b}{r_a} \cdot 10^{-4} = 2\mu_r \ln \left( \frac{D}{d} \right) \cdot 10^{-4}. \quad (1.19)$$

### 1.3 Емкость, Ф/км

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left( \frac{r_b}{r_a} \right)} = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left( \frac{D}{d} \right)}. \quad (1.20)$$

Для расчета эквивалентной диэлектрической проницаемости в общем случае используется формула

$$\varepsilon_{\text{э}} = \frac{\varepsilon_1 S_1 + \varepsilon_2 S_2}{S_1 + S_2}, \quad (1.21)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – относительные диэлектрические проницаемости первого и второго диэлектриков;

$S_1$ ,  $S_2$  – площади поперечного сечения первого и второго диэлектрика.

Для шайбовой изоляции

$$\varepsilon_{\text{э}} = \frac{\varepsilon_{\delta} b + \varepsilon_{\delta} a}{a + b}, \quad (1.22)$$

где  $a$  – толщина шайбы, мм;

$b$  – расстояние между шайбами, мм;

$\varepsilon_{\delta}$  – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха;

$\varepsilon_d$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала шайбы.

### 1.4 Проводимость изоляции, См/км

$$G = \frac{1}{R_{\text{из}}} + \omega C \text{tg} \delta, \quad (1.23)$$

где  $R_{\text{из}}$  – сопротивление изоляции кабельной цепи; равно 10000 МОм·км;

$\omega$  – круговая частота;

$\text{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь.

Для расчета эквивалентного тангенса угла диэлектрической проницаемости используется формула

$$\operatorname{tg} \delta_3 = \frac{\varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1 S_1 + \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 S_2}{\varepsilon_1 S_1 + \varepsilon_2 S_2}, \quad (1.24)$$

где  $\operatorname{tg} \delta_1$  и  $\operatorname{tg} \delta_2$  - тангенс угла диэлектрических потерь первого и второго диэлектрика.

Для шайбовой изоляции

$$\operatorname{tg} \delta_3 = \frac{\varepsilon_o \operatorname{tg} \delta_o a + \varepsilon_e \operatorname{tg} \delta_e b}{\varepsilon_e b + \varepsilon_o a}, \quad (1.25)$$

где  $\operatorname{tg} \delta_d$  - тангенс угла диэлектрических потерь материала шайбы;

$\operatorname{tg} \delta_b$  - тангенс угла диэлектрических потерь воздуха.

## 2 Вторичные параметры передачи

При расчете данных параметров для коаксиальной цепи вся частотная область делится на две подобласти. В зависимости от области применяются различные формулы расчета параметров.

2.1 Волновое сопротивление, Ом:

- при частоте свыше 2 МГц

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \ln \frac{D}{d}, \quad (2.1)$$

где  $Z_0 = 376,6$  Ом – волновое сопротивление воздуха;

- при частоте от 40 кГц до 2 МГц

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.2)$$

2.2 Коэффициент затухания

- при частоте свыше 2 МГц

$$\alpha = \frac{6,05 \sqrt{f \varepsilon_r}}{\ln \frac{D}{d}} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \cdot 10^{-3} + 9,08 f \sqrt{\varepsilon_r} \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-5} \text{ (дБ/км)}; \quad (2.3)$$

- при частоте от 40 кГц до 2 МГц

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ (Нп/км)} = 8,69 \left[ \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right] \text{ (дБ/км)}. \quad (2.4)$$

2.3 Коэффициент фазы, рад/км

- при частоте свыше 2 МГц

$$\beta = \omega \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c}, \quad (2.5)$$

где  $c=300\,000$  км/с – скорость света;  
- при частоте от 40кГц до 2 МГц

$$\beta = \omega \sqrt{LC}. \quad (2.6)$$

2.4 Скорость распространения электромагнитной энергии

- при частоте свыше 2 МГц

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}; \quad (2.7)$$

- при частоте от 40кГц до 2 МГц

$$v = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (2.8)$$

### 3 Влияние соотношения размеров проводников на параметры передачи

От соотношения размеров коаксиальной пары во многом зависит область применения коаксиальных кабелей. В частных случаях выделяют следующие оптимальные соотношения  $D/d$ :

- для передачи сигналов с минимальным затуханием для обоих медных проводников:

$$\frac{D}{d} = 3,6; \quad (3.1)$$

- для обеспечения максимума электрической прочности на пробой;

$$\frac{D}{d} = 2,72; \quad (3.2)$$

- для обеспечения максимальной передаваемой мощности:

$$\frac{D}{d} = 1,65. \quad (3.3)$$

В случае, если внешний проводник выполнен из другого металла, оптимальное соотношение размеров проводников для обеспечения минимального затухания меняется, значения соотношения диаметров проводников для различных металлов приведены в разделе справочных таблиц.

Минимально возможный (т.е. без учета потерь в диэлектрике) коэффициент затухания коаксиального кабеля с медными проводниками в спектре частот до 17 МГц при оптимальном соот-

## Направляющие среды электросвязи

ношении  $D/d$  определяется из выражения

$$\alpha = \alpha_m = \frac{21,7 \sqrt{f \varepsilon_s} \cdot 10^{-3}}{D}, \text{ дБ / км} . \quad (3.4)$$



## ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ

### 1 Нагрузка на растяжение

При механическом расчете оптического кабеля его элементы рассматриваются как система независимо деформирующихся цилиндров, при этом поперечным взаимодействием при растяжении вдоль оси кабеля пренебрегают. Допустимое растяжение  $F$ , Н, конструкции кабеля, который состоит из  $n$  элементов, рассчитывается по формуле:

$$F = \delta \sum_{i=1}^n k_i E_i S_i, \quad (1.1)$$

где  $\delta$  - коэффициент допустимого продольного растяжения конструкции кабеля,  $\delta=0,01...0,025$ ;

$k_i$  - коэффициент, учитывающий расположение  $i$ -го элемента относительно оси конструкции кабеля:

$k_i=0$  для элементов, не испытывающих напряжение (оптическое волокно);

$k_i=\cos\psi_i$  для элементов, испытывающих напряжение и расположенных по спирали с углом подъема  $\psi_i$  (обычно  $30...35^\circ$ ) - оболочка оптического модуля;

$k_i=1$  для элементов, испытывающих напряжение и расположенных параллельно оси кабеля (все остальные элементы);

$E_i$  - модуль продольной упругости материала  $i$ -го элемента конструкции, Па;

$S_i$  - поперечное сечение  $i$ -го элемента конструкции,  $\text{м}^2$ .

Если оптический кабель содержит только один силовой элемент - центральный, его сечение для нагрузки на растяжение  $F$  может быть рассчитано по формуле

$$S = \frac{1}{E_{\text{цс}}} \left( \frac{F}{\delta} - \sum_{i=1}^{n-1} k_i E_i S_i \right). \quad (1.2)$$

### 2 Основные параметры

К основным параметрам оптических кабелей относят следующие значения:

- относительное значение показателя преломления:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad (2.1)$$

где  $n_1$  - показатель преломления сердцевины оптоволокон-

на;

$n_2$  – показатель преломления оболочки оптоволокна;

- числовая апертура

$$NA = \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.2)$$

где  $\theta$  – максимальный угол ввода луча в волокно, при котором луч удерживается сердцевинной;

- нормированная частота

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}; \quad (2.3)$$

- число мод:

$$N = \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 \text{ в ступенчатом волокне}; \quad (2.4)$$

$$N = \frac{1}{4} \left( \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 \text{ в градиентном волокне}; \quad (2.5)$$

- длина волны отсечки

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 2,61a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}; \quad (2.6)$$

- критическая длина волны моды

$$\lambda_o = \frac{\pi d}{P_{nm} \cdot n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \text{ мкм} \quad (2.7)$$

где  $d$  – диаметр сердцевины оптического волокна;

$P_{nm}$  – значения корней функций Бесселя для различных типов волн;

$n_1$  – показатель преломления сердцевины;

$n_2$  – показатель преломления оболочки;

- критическая частота моды

$$f_o = \frac{P_{nm} \cdot c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \text{ Гц.} \quad (2.8)$$

### 3 Затухание

Затухание в оптическом кабеле состоит из собственных и кабельных потерь. Собственные потери состоят из

- потерь на рассеяние

$$\alpha_p = \frac{K}{(\lambda_{\text{мкм}})^4}, \quad (3.1)$$

## Направляющие среды электросвязи

где  $K$  – коэффициент рассеяния, для кварца равный  $0,8 \text{ (мкм}^4 \cdot \text{дБ)}/\text{км}$ ;

- потеря на поглощение

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \operatorname{tg} \delta}{\lambda_{[\text{км}]}} , \quad (3.2)$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь материала сердцевин оптического волокна.

Вследствие сложной структуры потерь на поглощение, оптические кабели используют в «окнах прозрачности» – на определенных длинах волн, где данный вид потерь минимален. Исторически используются три окна прозрачности:  $0,85 \text{ мкм}$ ,  $1,3 \text{ мкм}$  и  $1,55 \text{ мкм}$ .

При распространении электромагнитной волны с длиной волны порядка  $2 \text{ мкм}$  и более начинают интенсивно расти потери на поглощение. Это обусловлено иным механизмом потерь кварцевых волоконных световодов инфракрасной области спектра. В этом случае потери на поглощение рассчитываются как

$$\alpha = C e^{-k/\lambda_{[\text{м}]}} , \quad (3.4)$$

где  $C$  и  $k$  – постоянные коэффициенты (для кварца  $k=(0,7...0,9) \cdot 10^{-6}$ ,  $C=0,9$ ).

Кабельные потери складываются из множества составляющих, например, из потерь на микроизгибах:

$$\alpha_{\text{микро}} = k_3 N_n y_n^2 \frac{a^4}{\Delta^3 b^6} \left( \frac{E_o}{E_c} \right)^{3/2} , \quad (3.5)$$

где  $k_3=0,9...10$ ;

$N_n$  – число неоднородностей в виде выпуклостей со средней высотой  $y_n$  на единицу длины;

$a$  – радиус сердцевин;

$b$  – диаметр оптической оболочки;

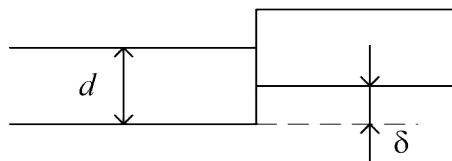
$\Delta$  – относительное значение показателя преломления;

$E_o$  и  $E_c$  – модули Юнга оболочки и сердцевин соответственно.

На участке сплетки оптических волокон затухание может достигать величин больших, чем в самом оптическом кабеле. Возможные варианты дефектов сопряжения оптических волокон:

- *радиальное смещение*

## Направляющие среды электросвязи

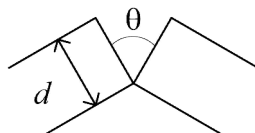


$$A_{\delta} = 10 \lg \frac{d}{d - \delta}, \text{ дБ}, \quad (3.6)$$

где  $d$  – диаметр сердцевины оптоволокна;

$\delta$  – радиальное смещение;

- *угловое смещение*

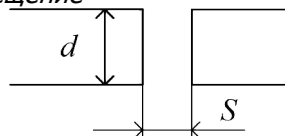


$$A_{\theta} = 10 \lg \frac{\theta_A}{\theta_A - \theta}, \text{ дБ}, \quad (3.7)$$

где  $\theta_A$  – апертурный угол волокна;

$\theta$  – угловое смещение;

- *осевое смещение*



$$A_S = 10 \lg \frac{2d}{2d - S \tg \theta_A}, \text{ дБ}, \quad (3.8)$$

где  $S$  – осевое смещение.

## 4 Дисперсия

Дисперсия в оптическом волокне определяет уширение импульсов при прохождении некоторого участка пути.

В общем случае дисперсия состоит из

- межмодовой дисперсии, имеющей место только в многомодовом волокне;
- хроматической дисперсии, наблюдающейся как в многомодовом, так и в одномодовом волокне.

Расчетные формулы для межмодовой дисперсии зависят от профиля показателя преломления и длины расчетного участка  $L$ . Для ступенчатого профиля показателя преломления применяется

## Направляющие среды электросвязи

формула

$$\tau_{\text{мод ст}}(L) = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta}{c} L, & L \leq L_c \\ \frac{n_1 \Delta}{c} \sqrt{LL_c}, & L > L_c \end{cases}, \quad (4.1)$$

а для градиентного (параболического) –

$$\tau_{\text{мод гр}}(L) = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L, & L \leq L_c \\ \frac{n_1 \Delta^2}{2c} \sqrt{LL_c}, & L > L_c \end{cases}, \quad (4.2)$$

где  $L_c$  – длина связи мод, равная 5-7 км для ступенчатого многомодового волокна и 10-15 км для градиентных волокон.

Хроматическая дисперсия состоит из

- материальной дисперсии

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda), \quad (4.3)$$

где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра излучения источника (1-3 нм для лазера и 20-40 нм для светоизлучающих диодов);

$M(\lambda)$  – удельная материальная дисперсия;

- волноводной дисперсии

$$\tau_{\text{вв}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot B(\lambda), \quad (4.4)$$

где  $B(\lambda)$  – удельная волноводная дисперсия;

профильной дисперсии, характерной для реального оптического кабеля

$$\tau_{\text{пр}} = \Delta\lambda \cdot L \cdot P(\lambda), \quad (4.5)$$

где  $P(\lambda)$  – удельная профильная дисперсия.

Хроматическая дисперсия рассчитывается по формуле

$$\tau_{\text{хром}} = \tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{вв}} + \tau_{\text{пр}}. \quad (4.6)$$

Общая дисперсия – в общем случае по формуле

$$\tau^2 = \tau_{\text{мод}}^2 + \tau_{\text{хром}}^2, \quad (4.7)$$

однако с учетом величин вкладов составляющих дисперсий имеем

- для одномодового волокна

$$\tau = \tau_{\text{хром}}; \quad (4.8)$$

- для многомодового волокна

$$\tau = \tau_{\text{мод}}. \quad (4.9)$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ксенофонов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Сборник задач. 2-е изд., стереотипное. М.:Горячая Линия-Телеком, 2014. 268 с. ISBN 978-5-9912-0138-4.

2. Гроднев И.И., Верник С.М. Линии связи. 5-е изд., переработанное и дополненное. М.: Радио и связь, 1988. 544 с. ISBN 5-256-00120-5.

3. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи: учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. 149 с.