



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

Симметричные кабели связи	4
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
Коаксиальные кабели связи	11
1 Первичные параметры передачи	11
2 Вторичные параметры передачи	14
3 Влияние соотношения размеров проводников на параметры передачи	15
Оптические кабели	17
1 Нагрузка на растяжение	17
2 Основные параметры	17
3 Затухание	18
4 Дисперсия.....	20
Литература	22

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.

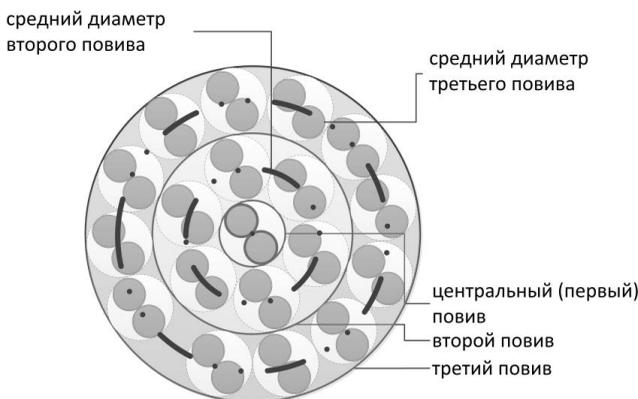


Рисунок 1.1

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	$0,965d_n$	$0,909d_s$	$0,956d_{on}$	$0,980d_{oz}$	$0,983d_6$

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;

χ – 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, $p=2$ для двойной парной);

Направляющие среды электросвязи

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, 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 ρ – удельное сопротивление металла проводника, Ом·мм²/м;
 l – длина проводника, км.

R_M на частотах 200кГц 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 α_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;

μ_r – относительная магнитная проницаемость;

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

2.3 Емкость идеальной цепи, Ф/км:

Направляющие среды электросвязи

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

где ε_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 Ψ – поправочный коэффициент, характеризующий близость металлических элементов, равный:

- для парной скрутки:

$$\Psi_{\text{п}} = \frac{(d_{\text{п}} + d_1 - d)^2 - a^2}{(d_{\text{п}} + d_1 - d)^2 + a^2}, \quad (2.9)$$

- 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 $d_{\text{п}}$, d_3 – диаметры соответствующих групп.

2.4 Проводимость изоляции, См/км:

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

где G_0 – проводимость изоляции по постоянному току;

G_1 – проводимость изоляции по переменному току;

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

ω – 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 проводом, т.е. $a/r \approx 50$ и нет заметного искажения электромагнитного поля за счет взаимодействия полей проводов, не возникает эффекта близости.

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

Направляющие среды электросвязи

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

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)

$$Z_e = \sqrt{\frac{R_0}{G_0}} = \sqrt{R_0 R_{uz}}; \quad (4.1)$$

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

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

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

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

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

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

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

Направляющие среды электросвязи

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} . \quad (4.5)$$

4.2 Коэффициент затухания, Нп/км:

- при постоянном токе ($f=0$ Гц)

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

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

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

- в тональном диапазоне ($f = 800$ Гц)

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

- в области высоких частот ($f > 40$ 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 ($f=0$ Гц)

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

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

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

- в тональном диапазоне ($f = 800$ Гц)

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

- в области высоких частот ($f > 40$ 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 распространения электромагнитной энергии, км/с:

- при постоянном токе ($f=0$ Гц)

Направляющие среды электросвязи

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

- 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

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

4.6 Коэффициент затухания кабельной цепи при температуре, отличной от $+20^\circ\text{C}$, можно найти по формуле

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

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;

σ_a, σ_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 τ мм, поверх которого наложен экран из n лент толщиной Δ мм каждая, равно:

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

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 ρ_M – удельное сопротивление меди, Ом·мм²/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 μ_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 -

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

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

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_1 S_1 + \varepsilon_2 S_2}{S_1 + S_2}, \quad (1.21)$$

где ε_1 и ε_2 – относительные диэлектрические проницаемости первого и второго диэлектриков;

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

Для шайбовой изоляции

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_d b + \varepsilon_a a}{a + b}, \quad (1.22)$$

где a – толщина шайбы, мм;

b – расстояние между шайбами, мм;

ε_a – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха;

ε_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;

ω – круговая частота;

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

Направляющие среды электросвязи

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

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

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

- при частоте от 40кГц до 2 МГц

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

2.2 Коэффициент затухания

- при частоте свыше 2 МГц

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

- при частоте от 40кГц 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

Направляющие среды электросвязи

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

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 соотношении D/d определяется из выражения

Направляющие среды электросвязи

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

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 δ - 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 ψ_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, m^2 .

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

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

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 оптоволокна;

n_2 - показатель преломления оболочки оптоволокна;

Направляющие среды электросвязи

- числовая апертура

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

где θ – 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:

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

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

- 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

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

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

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

3 Затухание

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

- потерь на рассеяние

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

где K – коэффициент рассеяния, для кварца равный 0,8 (мкм⁴·дБ)/км;

- потерь на поглощение

Направляющие среды электросвязи

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

где $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь материала сердцевины 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 мкм, 1,3 мкм и 1,55 мкм.

При распространении электромагнитной волны с длиной волны порядка 2 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

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

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 сердцевины;

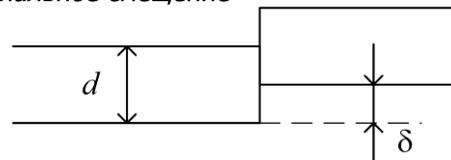
b - диаметр оптической оболочки;

Δ - относительное значение показателя преломления;

E_o и E_c - модули Юнга оболочки и сердцевины соответственно.

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

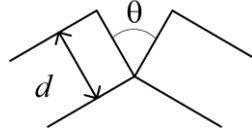
- *радиальное смещение*



Направляющие среды электросвязи

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

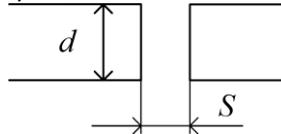
где d – диаметр сердцевины оптоволокна;
 δ – радиальное смещение;
 • *угловое смещение*



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

где θ_A – апертурный угол волокна;
 θ – угловое смещение;

- *осевое смещение*



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

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 формула

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

Направляющие среды электросвязи

а для градиентного (параболического) –

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

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

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

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

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

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. Ксенофонтов 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.