



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Радиоэлектроника»

СБОРНИК ЗАДАЧ по дисциплине

«Направляющие среды электросвязи»

Авторы

Шокова Ю. А.

Звездина М.Ю.

Ростов-на-Дону, 2016

Аннотация

Сборник задач предназначен для проведения практических занятий по дисциплине "Направляющие среды электросвязи" для студентов, обучающихся по направлению 11.03.02. Практические занятия прививают навыки расчета конструкции и параметров передачи симметричных и коаксиальных кабелей электросвязи, воздушных линий, а также конструктивных параметров и свойств оптических кабелей. Сборник может быть использован для самостоятельной работы.

Авторы



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

Шокова Юлия
Александровна



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

Звездина Марина
Юрьевна

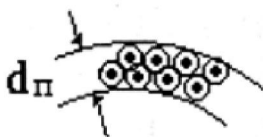
Оглавление

Симметричные кабели связи.....	4
1 Элементы конструкции симметричных кабелей связи ...	4
2 Первичные параметры передачи	7
3 Первичные параметры передачи воздушных линий.....	13
4 Вторичные параметры передачи.....	18
5 Вторичные параметры передачи воздушных линий	26
Коаксиальные кабели связи.....	32
1 Первичные параметры передачи	32
2 Вторичные параметры передачи.....	37
3 Влияние соотношения размеров проводников на параметры передачи	41
Оптические кабели.....	44
1 Нагрузка на растяжение	44
2 Основные параметры.....	49
3 Затухание	53
4 Дисперсия.....	57
Литература.....	60
Справочные материалы.....	61
Общие таблицы	61
Симметричные кабели связи.....	64
Воздушные линии	66
Коаксиальные кабели	70
Оптические кабели	72
Ответы к задачам	77
Симметричные кабели связи.....	77
Коаксиальные кабели связи.....	80

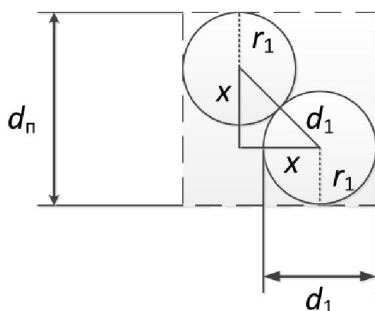
СИММЕТРИЧНЫЕ КАБЕЛИ СВЯЗИ

1 Элементы конструкции симметричных кабелей связи

1.1 Решение типовых задач



1. Геометрические размеры кабеля зависят от диаметра группы, образующей основополагающую единицу конструкции. В случае парной скрутки толщина, прибавляемая каждым поводом к диаметру кабеля, будет равна средней ширине пространства, занимаемого парой. И в то же время эта толщина не будет равна двойному диаметру изолированной жилы $2d_1$. Вывести формулу для расчета толщины повива (диаметра группы) для парной скрутки.



Толщину повива, состоящего из проводников парной скрутки d_n легко найти, определив катеты прямоугольного равнобедренного треугольника, гипотенузой которого является расстояние, равное диаметру изолированного проводника d_1 .

По теореме Пифагора (см. рисунок): $d_1^2 = x^2 + x^2 = 2x^2$. Откуда

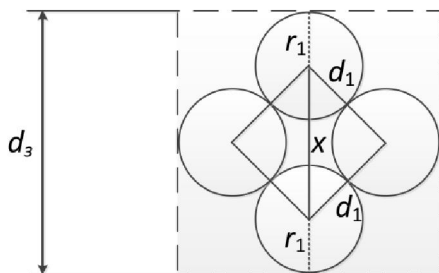
$$x = \frac{d_1}{\sqrt{2}}.$$

Диаметр парной скрутки:

$$d_n = 2r_1 + x = d_1 + x = d_1 + \frac{d_1}{\sqrt{2}} = d_1 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 1,71d_1.$$

2. Вывести формулу для расчета толщины повива (диаметра группы) для звездной скрутки.

Направляющие среды электросвязи



Толщину повива, состоящего из проводников парной скрутки d_3 легко найти, определив гипотенузу прямоугольного равнобедренного треугольника, катетами которого являются расстояния, равные диаметру изолированного проводника

d_1 .

По теореме Пифагора (см. рисунок): $x^2 = 2d_1^2$. Откуда $x = \sqrt{2} d_1$.

Диаметр звездной скрутки:

$$d_3 = 2r_1 + x = d_1 + x = d_1 + \sqrt{2}d_1 = d_1(1 + \sqrt{2}) = 2,41d_1.$$

3. Во сколько раз отличается толщина повивов, состоящих из двух разных типов групп проводников, если в первом случае использована парная скрутка, во втором – звездная? На сколько изменится это соотношение в случае дополнительного обжима бумажной изоляции?

Используя данные, полученные в задачах 1 и 2, имеем:

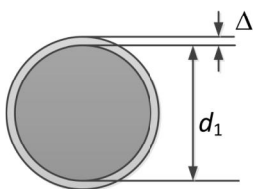
$$\frac{d_n}{d_3} = \frac{1,71d_1}{2,41d_1} = 0,71.$$

Таким образом, толщина повива, состоящего из проводников парной скрутки, будет в 0,71 раза меньше толщины повива звездной скрутки.

При дополнительном обжиме:

$$\frac{d_n}{d_3} = \frac{0,965d_n}{0,909d_3} = \frac{0,965}{0,909} \cdot 0,71 = 0,75.$$

При дополнительном обжиме толщина повива, состоящего из проводников парной скрутки, будет в 0,75 раз меньше толщины повива звездной скрутки.



4. На сколько процентов отличается длина проводников, используемых во втором и четвертом повивах кабеля ТГ 100х2х0,5. Шаг скрутки жил 100 мм.

Диаметр изолированного проводника:

$$d_1 = d + 2\Delta = 0,5 + 2 \cdot 0,05 = 0,6 \text{ мм.}$$

Диаметр группы (пары):

$$d_n = 1,71d_1 = 1,71 \cdot 0,6 = 1,026 \text{ мм.}$$

Диаметр центрального повива при $n=2$:

$$D = 1,026 \left[1 + \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{2}} \right] = 1,026 \left[1 + \frac{1}{\sin(90^\circ)} \right] = 1,026 \cdot 2 = 2,052 \text{ мм.}$$

Средние диаметры (диаметр окружности, проведенный через центры сечения групп соответствующих повивов):

- для 2 повива $D_2 = D + d_n = 2,052 + 1,026 = 3,078 \text{ мм};$

- для 4 повива $D_4 = D + 5d_n = 2,052 + 5 \cdot 1,026 = 7,182 \text{ мм}.$

Коэффициенты укрутки проводников:

- для 2 повива: $\chi_2 = \sqrt{1 + \pi^2 \left(\frac{D_2}{h} \right)^2} = \sqrt{1 + 3,14^2 \left(\frac{3,078}{100} \right)^2} = 1,005;$

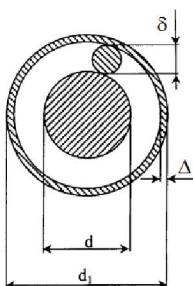
- для 4 повива $\chi_4 = \sqrt{1 + \pi^2 \left(\frac{D_4}{h} \right)^2} = \sqrt{1 + 3,14^2 \left(\frac{7,182}{100} \right)^2} = 1,025.$

Длина скрученных жил в повивах по отношению к длине кабеля L :

- втором $L_2 = \chi_2 L = 1,005 \cdot L;$

- четвертом $L_4 = \chi_4 L = 1,025 \cdot L.$

Длина жил в четвертом повиве превышает длину жил во втором повиве на $\frac{L_4}{L_2} = \frac{1,025 \cdot L}{1,005 \cdot L} \cdot 100\% = 101,99\%.$



5. Найти расстояния между центрами пар проводников, находящихся внутри четверки МКС-7х4х1,2. Определить диаметр звездной группы.

➤ **Указание:** парой проводников в четверке называются противоположно расположенные проводники внутри четверки.

Диаметр изолированной жилы:

$$d_1 = d + 2\delta + 2\Delta = 1,2 + 2 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,05 = 2,9 \text{ мм}.$$

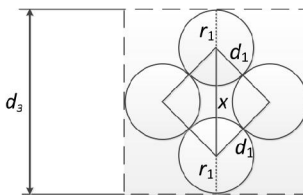
Расстояние между парами соответствует величине x .

По теореме Пифагора: $x^2 = 2d_1^2$.

Откуда

$$x = \sqrt{2} d_1 = 1,41 \cdot d_1 = 4,09 \text{ мм}.$$

Диаметр звездной группы
 $d_3 = 2,41 d_1 = 6,99 \text{ мм}.$



1.2 Задачи для самостоятельного решения

1. Определить, сколько килограмм меди и свинца находятся в строительной длине кабеля ТГ 10х2х0,5.

2. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле с кордельно-бумажной изоляцией МКГ 4х4х1,2 и определить диаметр звездной группы.

3. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле с кордельно-бумажной изоляцией МКПГ 4х4х1,2 и определить диаметр звездной группы.

4. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле со сплошной полиэтиленовой изоляцией МКПВ 4х4х1,2 и определить диаметр звездной группы.

5. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле с пористо-полиэтиленовой изоляцией МКПП 1х4х1,2 и определить диаметр звездной группы.

6. На сколько процентов отличается расстояние между центрами пары проводников четверок кабелей МКПГ 4х4х1,2 и МКПП 4х4х1,05?

2 Первичные параметры передачи

2.1 Решение типовых задач

1. Определить, насколько изменится сопротивление сим-

Направляющие среды электросвязи

метричной цепи в кабеле МКСГ 4х4х1,2, если в первом случае по ней организован стандартный канал тональной частоты, во втором была использована система передачи К-60, в третьем случае – ИКМ-30. Расчеты проводить на верхних частотах передаваемых сигналов.

Диаметр изолированной жилы:

$$d_1 = d + 2\delta + 2 \cdot 2\Delta = 1,2 + 2 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,05 = 2,9 \text{ мм}.$$

Расстояние между центрами проводников:

$$a = \sqrt{2}d_1 = 1,41 \cdot 2,9 = 4,09 \text{ мм}.$$

Сопротивление проводника постоянному току:

$$R_0 = \frac{4000\rho}{\pi d^2} = \frac{4000 \cdot 0,0175}{3,14 \cdot (1,2)^2} = 15,48 \text{ Ом/км}.$$

Значения kr для заданных частот:

$$\text{- ТЧ (4 кГц)} \quad 0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{4000} = 0,8.$$

$$\text{- К-60 (252 кГц)} \quad 0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{252000} = 6,3.$$

$$\text{- ИКМ-30 (2048 кГц)} \quad 0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{2048000} = 18,0.$$

Значения функций $F(kr)$, $G(kr)$, $H(kr)$ для заданных частот:

- ТЧ: $F(kr)=0,002$; $G(kr)$, $H(kr)$ можно не рассчитывать, т.к. передача идет на низкой частоте.

$$\text{- К-60: } F(kr)=1,498; \quad G(kr)=0,985; \quad H(kr)=0,586.$$

$$\text{- ИКМ-30: } F(kr)=\frac{\sqrt{2}kr-3}{4}=\frac{\sqrt{2} \cdot 18-3}{4}=5,614;$$

$$G(kr)=\frac{\sqrt{2}kr-1}{8}=\frac{\sqrt{2} \cdot 18-1}{8}=3,057;$$

$$H(kr)=\frac{1}{4}\left[\frac{3\sqrt{2}kr-5}{\sqrt{2}kr-1}-\frac{2\sqrt{2}}{kr}\right]=0,25 \cdot \left[\frac{3\sqrt{2}18-5}{\sqrt{2}18-1}-\frac{2\sqrt{2}}{18}\right]=0,69.$$

Сопротивление дополнительных потерь на вихревые токи в соседних проводах и металлической оболочке:

$$\text{- ТЧ: } R_M = R_{M200} \sqrt{\frac{f[\text{кГц}]}{200}} = (7,5 + 14) \sqrt{\frac{4}{200}} = 3,04 \text{ Ом/км}.$$

$$\text{- К-60: } R_M = R_{M200} \sqrt{\frac{f[\text{кГц}]}{200}} = (7,5 + 14) \sqrt{\frac{252}{200}} = 24,13 \text{ Ом/км}.$$

$$\text{- ИКМ-30: } R_M = R_{M200} \sqrt{\frac{f[\text{кГц}]}{200}} = (7,5 + 14) \sqrt{\frac{2048}{200}} = 68,8 \text{ Ом/км}.$$

Активное сопротивление цепи переменному току (коэф-

Направляющие среды электросвязи

коэффициент $p=5$)

$$- \text{ТЧ: } R = 2R_0\chi[1 + F(kr)] + R_m = 2 \cdot 15,48 \cdot 1,02 \cdot [1 + 0,002] + 3,04 = 31,64 + 3,04 = 34,68 \text{ Ом/км};$$

$$- \text{К-60: } R = 2R_0\chi \left[1 + F(kr) + \frac{pG(kr)(d/a)^2}{1 - H(kr)(d/a)^2} \right] + R_m = 2 \cdot 15,48 \cdot 1,02 \times \\ \times \left[1 + 1,498 + \frac{5 \cdot 0,985 \cdot \left(\frac{1,2}{4,09} \right)^2}{1 - 0,586 \cdot \left(\frac{1,2}{4,09} \right)^2} \right] + 24,13 = 92,98 + 24,13 = 117,11 \text{ Ом/км};$$

$$- \text{ИКМ-30 } R = 2R_0\chi \left[1 + F(kr) + \frac{pG(kr)(d/a)^2}{1 - H(kr)(d/a)^2} \right] + R_m = 2 \cdot 15,48 \cdot 1,02 \times \\ \times \left[1 + 5,614 + \frac{5 \cdot 3,057 \cdot \left(\frac{1,2}{4,09} \right)^2}{1 - 0,69 \cdot \left(\frac{1,2}{4,09} \right)^2} \right] + 68,8 = 253,04 + 68,8 = 321,84 \text{ Ом/км}.$$

Разница показателей:

$$- \text{ между ТЧ и К-60: } \Delta R = 117,11 - 34,68 = 82,43 \text{ Ом/км};$$

$$- \text{ между К-60 и ИКМ-30: } \Delta R = 321,84 - 117,11 = 204,73 \text{ Ом/км};$$

$$- \text{ между ТЧ и ИКМ-30: } \Delta R = 321,84 - 34,68 = 287,16 \text{ Ом/км}.$$

2. Определить, во сколько раз уменьшится внутренняя индуктивность симметричной цепи в кабеле МКСГ 4х4х1,2, если в первом случае по ней организован один стандартный канал тональной частоты, а во втором случае была использована система передачи К-300. Чему будут при этом равны общие значения индуктивности данной симметричной цепи? Расчеты проводить на верхних частотах передаваемых сигналов.

Из решения задачи 1 имеем следующие параметры цепи: диаметр изолированной жилы: $d_1 = 2,9 \text{ мм}$; расстояние между центрами проводников $a = 4,09 \text{ мм}$.

Значения kr для заданных частот:

$$- \text{ТЧ (4 кГц): } 0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{4000} = 0,8.$$

Направляющие среды электросвязи

- К-300 (1300 кГц): $0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{1300000} = 14,37$.

Значение функции $Q(kr)$ для заданных частот:

- ТЧ: $Q(kr) = 0,999$.

- К-300 $Q(kr) = \frac{2\sqrt{2}}{kr} = \frac{2\sqrt{2}}{14,37} = 0,197$.

Внутренняя индуктивность на заданных частотах:

- ТЧ: $L_a = 0,5 \cdot \chi \cdot \mu_r Q(kr) \cdot 10^{-4} = 0,5 \cdot \chi \cdot 0,999 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$.

- К-300 $L_a = 0,5 \cdot \chi \cdot \mu_r Q(kr) \cdot 10^{-4} = 0,5 \cdot \chi \cdot 0,197 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$.

Отношение внутренних индуктивностей:

$$\frac{L_{a\text{ТЧ}}}{L_{a\text{К-300}}} = \frac{0,5 \cdot \chi \cdot 0,999 \cdot 10^{-4}}{0,5 \cdot \chi \cdot 0,197 \cdot 10^{-4}} = 5,071, \text{ т.е. внутренняя индуктивность на}$$

тональной частоте будет в 5,071 раз больше.

Индуктивность на двух частотах:

- ТЧ: $L = \chi \left[4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = 1,02 \cdot \left[4 \ln \frac{4,09 - \frac{1,2}{2}}{\frac{1,2}{2}} + 0,999 \right] \times$

$$\times 10^{-4} = 8,20 \cdot 10^{-4} = 0,820 \cdot 10^{-3} = 0,820 \text{ мГн/км};$$

- К-300: $L = \chi \left[4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = 1,02 \cdot \left[4 \ln \frac{4,09 - \frac{1,2}{2}}{\frac{1,2}{2}} + 0,197 \right] \times$

$$\times 10^{-4} = 0,739 \text{ мГн/км}.$$

3. Определить, насколько отличаются емкости идеальной и реальной симметричных цепей кабеля МКСГ 4х4х1,2, если их параметры совпадают.

Из решения задачи 1 имеем следующие параметры цепи: диаметр изолированной жилы: $d_1 = 2,9 \text{ мм}$; расстояние между центрами проводников $a = 4,09 \text{ мм}$.

Диаметр группы $d_3 = 2,41d_1 = 2,41 \cdot 2,9 = 6,99 \text{ мм}$.

Емкость

идеальной

цепи:

Направляющие среды электросвязи

$$C_{\text{из}} = \frac{\pi \varepsilon_a}{\ln \frac{a-r}{r}} = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{a-r}{r}} = \frac{1,25 \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{4,09 - 0,5 \cdot 1,2}{0,5 \cdot 1,2}} = 19,72 \text{ нФ/км}.$$

Поправочный коэффициент, характеризующий близость проводников звездной скрутки

$$\Psi_3 = \frac{(d_3 + d_1 - d)^2 - a^2}{(d_3 + d_1 - d)^2 + a^2} = \frac{(6,99 + 2,9 - 1,2)^2 - 4,09^2}{(6,99 + 2,9 - 1,2)^2 + 4,09^2} = 0,637.$$

Емкость реальной цепи:

$$C_{\text{рц}} = \frac{\chi \varepsilon_r 10^{-6}}{36 \ln \left[\frac{a \Psi}{r} \right]} = \frac{1,02 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6}}{36 \ln \left[\frac{4,09 \cdot 0,637}{0,5 \cdot 1,2} \right]} = 24,12 \text{ нФ/км}.$$

Разница емкостей $C_{\text{рц}} - C_{\text{из}} = 24,12 - 19,72 = 4,4 \text{ нФ/км}.$

4. Определить, во сколько раз отличается проводимость изоляции симметричной пары в кабелях МКСГ 4х4х1,2 и МКГ 4х4х1,2. На кабелях работает система передачи К-60. Расчеты проводить на верхней и нижней частотах.

Рассчитаем параметры цепей.

МКСГ-4х4 (из задачи 1): диаметр изолированной жилы $d_1 = 2,9 \text{ мм}$; расстояние между центрами проводников $a = 4,09 \text{ мм}$; диаметр группы $d_3 = 6,99 \text{ мм}$; емкость $C = 24,12 \text{ нФ/км}.$

МКГ-4х4:

диаметр изолированной жилы:

$$d_1 = d + 2\delta + 2 \cdot 2\Delta = 1,2 + 2 \cdot 0,81 + 2 \cdot 2 \cdot 0,17 = 3,5 \text{ мм}.$$

Расстояние между центрами проводников

$$a = \sqrt{2} d_1 = 1,41 \cdot 3,5 = 4,94 \text{ мм}.$$

Диаметр группы $d_3 = 2,41 d_1 = 2,41 \cdot 3,5 = 8,44 \text{ мм}.$

Поправочный коэффициент:

$$\Psi_3 = \frac{(d_3 + d_1 - d)^2 - a^2}{(d_3 + d_1 - d)^2 + a^2} = \frac{(8,44 + 3,5 - 1,2)^2 - 4,94^2}{(8,44 + 3,5 - 1,2)^2 + 4,94^2} = 0,651.$$

Направляющие среды электросвязи

$$\text{Емкость: } C = \frac{\chi \varepsilon_r 10^{-6}}{36 \ln \left[\frac{a \psi}{r} \right]} = \frac{1,02 \cdot 1,35 \cdot 10^{-6}}{36 \ln \left[\frac{4,94 \cdot 0,651}{0,5 \cdot 1,2} \right]} = 22,78 \text{ нФ/км}.$$

Значения $\text{tg} \delta$:

а) МКСГ

- нижняя частота (12кГц) $3 \cdot 10^{-4}$;
- верхняя частота (252 кГц) $12 \cdot 10^{-4}$;

б) МКГ

- нижняя частота (12кГц) $55 \cdot 10^{-4}$;
- верхняя частота (252 кГц) $160 \cdot 10^{-4}$.

Оба кабеля – магистральные. $R_{из} = 10\,000 \text{ МОм} \cdot \text{км}$.

Проводимость:

а) МКСГ

$$\begin{aligned} \text{- 12кГц: } G &= \frac{1}{R_{из}} + \omega C \text{tg} \delta = \frac{1}{10000 \cdot 10^6} + 2 \cdot 3,14 \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot 24,12 \cdot 10^{-9} \cdot 3 \times \\ &\times 10^{-4} = 0,55 \text{ мкСм/км}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- 252 кГц: } G &= \frac{1}{R_{из}} + \omega C \text{tg} \delta = \frac{1}{10000 \cdot 10^6} + 2 \cdot 3,14 \cdot 252 \cdot 10^3 \cdot 24,12 \cdot 10^{-9} \times \\ &\times 12 \cdot 10^{-4} = 45,81 \text{ мкСм/км}; \end{aligned}$$

б) МКГ

$$\begin{aligned} \text{- 12кГц: } G &= \frac{1}{R_{из}} + \omega C \text{tg} \delta = \frac{1}{10000 \cdot 10^6} + 2 \cdot 3,14 \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot 22,78 \cdot 10^{-9} \cdot 55 \times \\ &\times 10^{-4} = 9,44 \text{ мкСм/км}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- 252 кГц: } G &= \frac{1}{R_{из}} + \omega C \text{tg} \delta = \frac{1}{10000 \cdot 10^6} + 2 \cdot 3,14 \cdot 252 \cdot 10^3 \cdot 22,78 \cdot 10^{-9} \times \\ &\times 160 \cdot 10^{-4} = 576,81 \text{ мкСм/км}. \end{aligned}$$

Отношение проводимостей:

$$\frac{G_{МКГ\,12}}{G_{МКСГ\,12}} = \frac{9,44}{0,55} = 17,16; \quad \frac{G_{МКГ\,252}}{G_{МКСГ\,252}} = \frac{576,81}{45,81} = 12,59.$$

2.2 Задачи для самостоятельного решения

1. Определить, насколько изменится сопротивление симметричной цепи в кабеле МКГ 4х4х1,2, если в первом случае по ней организован один стандартный канал тональной частоты, во втором использовалась система передачи КРР-30, в третьем случае - К-60. Расчеты проводить на верхних частотах.

2. Определить, насколько изменится сопротивление симметричной цепи в кабеле МКСГ 4х4х1,2, если в первом случае кабель находится в среде с температурой $t=20^{\circ}\text{C}$, во втором - $t=-30^{\circ}\text{C}$. По симметричной цепи работает система передачи К-60. Расчеты проводить на верхней и нижней частоте передаваемого сигнала.

3. Определить, во сколько раз изменится внутренняя индуктивность симметричной цепи в кабеле МКГ 4х4х1,2, если в первом случае по ней организован один стандартный канал тональной частоты, а во втором случае была использована система передачи К-60. Чему будут при этом равны общие значения индуктивности данной симметричной цепи? Расчеты проводить на верхних частотах передаваемых сигналов.

4. Определить, насколько отличаются емкости идеальной и реальной симметричных цепей кабеля МКГ 4х4х1,2, если их параметры совпадают.

5. Определить, во сколько раз отличается проводимость изоляции симметричной пары в кабелях МКГ 1х4х1,05 и МКГ 1х4х1,2. На кабелях работает система передачи К-60. Расчеты проводить на верхней частоте.

6. Определить, чему равны и во сколько раз отличаются сопротивления симметричных цепей первого и второго повива кабеля МКПГ 7х4х1,05. На кабелях работает система передачи К-60. Расчеты проводить на верхней частоте.

7. Определить, чему равны и во сколько раз отличаются сопротивления симметричных цепей первого и второго повива в кабелях МКПГ 7х4х1,05 и МКПА 7х4х1,05 соответственно. На кабелях работает система передачи КАМА. Расчеты проводить на верхней частоте системы передачи.

3 Первичные параметры передачи воздушных линий

3.1 Решение типовых задач

1. Определить, насколько изменится сопротивление симметричной цепи воздушной линии связи, если в первом случае

Направляющие среды электросвязи

цепь находится в среде с температурой $t=+30^{\circ}\text{C}$, во втором – с температурой $t=-30^{\circ}\text{C}$. По симметричной цепи из стальных проводов диаметром 4мм работает система передачи В-3-3. Расчеты проводить на верхней и нижней частотах передаваемых сигналов.

Коэффициент вихревых токов:

- 4кГц $k = 0,075\sqrt{f} = 0,075\sqrt{4000} = 4,74$, откуда $kr=9,5$;

- 31 кГц $k = 0,075\sqrt{f} = 0,075\sqrt{31000} = 13,20$, откуда $kr=26,4$.

Значения коэффициента $F(kr)$:

- 4 кГц $F(kr)=2,62$;

- 31 кГц $F(kr) = \frac{\sqrt{2}kr - 3}{4} = \frac{1,41 \cdot 26,4 - 3}{4} = 8,56$.

Сопротивление цепи постоянному току:

$$R_0 = \frac{4000\rho}{\pi d^2} = \frac{4000 \cdot 0,138}{3,14 \cdot 4^2} = 10,99 \text{ Ом/км}.$$

Сопротивление переменному току при температуре $+20^{\circ}\text{C}$:

- 4кГц $R = 2R_0[1 + F(kr)] = 2 \cdot 10,99 \cdot (1 + 2,62) = 79,55 \text{ Ом/км}$;

- 31 кГц $R = 2R_0[1 + F(kr)] = 2 \cdot 10,99 \cdot (1 + 8,56) = 210,08 \text{ Ом/км}$.

Сопротивление переменному току при температуре $+30^{\circ}\text{C}$:

- 4кГц $R_t = R_{20}[1 + \alpha_R(t - 20)] = 79,55 \cdot [1 + 0,0046 \cdot (30 - 20)] = 79,55 \times [1 + 0,046] = 83,21 \text{ Ом/км}$;

- 31 кГц $R_t = R_{20}[1 + \alpha_R(t - 20)] = 210,08 \cdot [1 + 0,0046 \cdot (30 - 20)] = 210,08 \times [1 + 0,046] = 219,74 \text{ Ом/км}$.

Сопротивление переменному току при температуре -30°C :

- 4кГц $R_t = R_{20}[1 + \alpha_R(t - 20)] = 79,55 \cdot [1 + 0,0046 \cdot (-30 - 20)] = 79,55 \times [1 - 0,23] = 61,25 \text{ Ом/км}$;

- 31 кГц $R_t = R_{20}[1 + \alpha_R(t - 20)] = 210,08 \cdot [1 + 0,0046 \cdot (-30 - 20)] = 210,08 \cdot 0,77 = 161,76 \text{ Ом/км}$.

Разница сопротивлений

- на нижней частоте $\Delta R = 83,21 - 61,25 = 21,96 \text{ Ом/км}$;

- на верхней частоте $\Delta R = 219,74 - 161,76 = 57,98 \text{ Ом/км}$.

2. Определить, насколько изменится индуктивность первой симметричной цепи профиля №3 в воздушной линии связи, если в первом случае на ней использованы стальные провода диаметром 4 мм, а во втором – медные того же диаметра. По симмет-

Направляющие среды электросвязи

ричной цепи работает система передачи В-3-3. Расчет проводить на верхней и нижней частотах системы передачи.

Расстояние между проводами первой цепи профиля №3 равно 20 см.

Коэффициент вихревых токов для стальных проводов – из задачи 1:

- 4кГц: $kr=9,5$;
- 31 кГц: $kr=26,4$.

Для медных проводов

- 4кГц $k = 0,021\sqrt{f} = 0,021\sqrt{4000} = 1,33$, откуда $kr=2,7$;
- 31 кГц $k = 0,021\sqrt{f} = 0,021\sqrt{31000} = 3,7$, откуда $kr=7,4$.

Значения коэффициента $Q(kr)$ для стальных проводов

- 4 кГц $Q(kr)= 0,296$;
- 31 кГц $Q(kr)=\frac{2\sqrt{2}}{kr}=\frac{2\cdot 1,41}{26,4}=0,107$;

для медных проводов:

- 4 кГц $Q(kr)= 0,888$;
- 31 кГц $Q(kr)= 0,379$.

Индуктивность для стальных проводов:

- 4 кГц $L = \left[4\ln\frac{a}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = \left[4\ln\frac{20\cdot 10}{2} + 130 \cdot 0,296 \right] \cdot 10^{-4} =$
 $= 5,69 \text{ мГн/км};$
- 31 кГц $L = \left[4\ln\frac{a}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = \left[4\ln\frac{20\cdot 10}{2} + 130 \cdot 0,107 \right] \cdot 10^{-4} =$
 $= 3,23 \text{ мГн/км};$

для медных проводов:

- 4 кГц $L = \left[4\ln\frac{a}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = \left[4\ln\frac{20\cdot 10}{2} + 0,888 \right] \cdot 10^{-4} =$
 $= 1,93 \text{ мГн/км};$
- 31 кГц $L = \left[4\ln\frac{a}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = \left[4\ln\frac{20\cdot 10}{2} + 0,379 \right] \cdot 10^{-4} =$
 $= 1,88 \text{ мГн/км}.$

Разница в индуктивности:

- 4 кГц $\Delta L = 5,69 - 1,93 = 3,76 \text{ мГн/км};$
- 31 кГц $\Delta L = 3,23 - 1,88 = 1,35 \text{ мГн/км}.$

Направляющие среды электросвязи

3. Определить, насколько отличаются емкости 12 и 13 симметричных цепей профиля №4 в воздушной линии связи, если на ней использованы стальные провода диаметром 4 мм.

Расстояние между проводами 12 цепи профиля №4 равно 20 см, между проводами 13 цепи – 60 см.

Емкости

$$12 \text{ цепь: } C = \frac{10^{-6}}{36 \ln \frac{a}{r}} = \frac{10^{-6}}{36 \ln \frac{20 \cdot 10}{0,5 \cdot 4}} = 6,03 \text{ нФ/км};$$

$$13 \text{ цепь: } C = \frac{10^{-6}}{36 \ln \frac{a}{r}} = \frac{10^{-6}}{36 \ln \frac{60 \cdot 10}{0,5 \cdot 4}} = 4,87 \text{ нФ/км}.$$

$$\text{Разность емкостей } \Delta C = 6,03 - 4,87 = 1,16 \text{ нФ/км}.$$

4. Определить, насколько отличаются проводимости изоляции симметричной цепи воздушной линии связи на верхней и нижней частоте системы передачи В-З-З. Расчет проводить в сухую и сырую погоду.

В сухую погоду

$$- 4 \text{ кГц } G = G_0 + nf = 0,01 \cdot 10^{-6} + 0,05 \cdot 10^{-9} \cdot 4 \cdot 10^3 = 0,21 \text{ мкСм/км}.$$

$$- 31 \text{ кГц } G = G_0 + nf = 0,01 \cdot 10^{-6} + 0,05 \cdot 10^{-9} \cdot 31 \cdot 10^3 = 1,56 \text{ мкСм/км}.$$

В сырую погоду

$$- 4 \text{ кГц } G = G_0 + nf = 0,05 \cdot 10^{-6} + 0,25 \cdot 10^{-9} \cdot 4 \cdot 10^3 = 1,05 \text{ мкСм/км}.$$

$$- 31 \text{ кГц } G = G_0 + nf = 0,05 \cdot 10^{-6} + 0,25 \cdot 10^{-9} \cdot 31 \cdot 10^3 = 7,8 \text{ мкСм/км}.$$

Разность проводимостей:

$$- 4 \text{ кГц } \Delta G = 1,05 - 0,21 = 0,84 \text{ мкСм/км}.$$

$$- 31 \text{ кГц } \Delta G = 7,8 - 1,56 = 6,24 \text{ мкСм/км}.$$

3.2 Задачи для самостоятельного решения

1. Определить, во сколько раз увеличится сопротивление симметричной цепи воздушной линии связи, если в первом случае на ней использованы медные провода диаметром 4 мм, а во втором – стальные того же диаметра. По симметричной цепи работает система передачи В-З-З. Расчеты проводить на верхней и ниж-

ней частотах передаваемых сигналов.

2. Определить, насколько изменится сопротивление симметричной цепи воздушной линии связи, если в первом случае на ней работает система передачи В-3-3, а во втором – В-12-2. В цепи используются медные провода диаметром 4 мм. Расчеты проводить на верхней и нижней частотах передаваемых сигналов.

3. Определить, насколько изменится сопротивление симметричной цепи воздушной линии связи, если в первом случае цепь находится в среде с температурой $t=+25^{\circ}\text{C}$, во втором – с температурой $t=-20^{\circ}\text{C}$. По симметричной цепи из стальных проводов диаметром 4 мм работает система передачи В-2-2. Расчеты проводить на верхней и нижней частотах передаваемых сигналов.

4. Определить, насколько изменится сопротивление симметричной цепи воздушной линии связи, если в первом случае цепь находится в среде с температурой $t=+30^{\circ}\text{C}$, во втором – с температурой $t=-20^{\circ}\text{C}$. По симметричной цепи из медных проводов диаметром 4 мм работает система передачи В-12-2. Расчеты проводить на верхней и нижней частотах передаваемых сигналов.

5. Определить, насколько изменится индуктивность первой симметричной цепи профиля №1 в воздушной линии связи, если в первом случае на ней использованы стальные провода диаметром 4 мм, а во втором – медные того же диаметра. По симметричной цепи работает система передачи В-3-3. Расчет проводить на верхней и нижней частотах системы передачи.

6. Определить, насколько отличаются индуктивности 8 и 9 симметричных цепей профиля №3 в воздушной линии связи, если на ней использованы медные провода диаметром 4 мм. По симметричной цепи работает система передачи В-12-2. Расчет проводить на верхней и нижней частотах системы передачи.

7. Определить, насколько отличаются индуктивности 4 и 5 симметричных цепей профиля №2а в воздушной линии связи, если на ней использованы стальные провода диаметром 4 мм. По симметричной цепи работает система передачи В-2-2. Расчет проводить на верхней и нижней частотах системы передачи.

8. Определить, насколько изменится индуктивность первой симметричной цепи профиля №1 в воздушной линии связи, если по симметричной цепи в первом случае работает система передачи В-2-2, а во втором – В-3-3. На линии использованы стальные провода диаметром 4 мм. Расчет проводить на верхней и нижней частотах системы передачи.

9. Определить, насколько отличаются емкости 12 и 13 симметричных цепей профиля №4а в воздушной линии связи, если на ней использованы стальные провода диаметром 4 мм.

10. Определить, во сколько раз отличаются проводимости изоляции симметричной цепи воздушной линии связи, если в первом случае по ней работает система передачи В-3-3, а во втором – система передачи В-12-2. Расчет проводить на верхней и нижней частотах в сухую погоду.

4 Вторичные параметры передачи

4.1 Решение типовых задач

1. Определить минимальное и максимальное значения волнового сопротивления электромагнитной волне, проходящей по симметричной паре кабеля МКСГ 4х4х1,2, если кабель работает с системой передачи К-60.

Экстремальные значения волнового сопротивления будут наблюдаться на верхней и нижней частотах системы передач. Для расчета вторичных параметров передачи рассчитаем первичные параметры R , L , C , G .

Из задач 1, 3 и 4 темы 2 («Первичные параметры передачи») имеем:

- активное сопротивление переменному току на частоте 252 кГц $R = 117,11$ кГц;
- емкость $C = 24,12$ нФ/км;
- проводимость изоляции на частоте 12 кГц $G = 0,55$ мкСм/км;
- проводимость изоляции на частоте 252 кГц $G = 45,81$ мкСм/км.

Таким образом, необходимо найти значение R на частоте 12 кГц и L на обеих частотах.

Из задачи 1 темы 2 также имеем:

- диаметр изолированной жилы: $d_1 = 2,9$ мм ;

Направляющие среды электросвязи

- расстояние между центрами проводников $a = 4,09 \text{ мм}$;
- диаметр группы $d_3 = 6,99 \text{ мм}$;
- сопротивление проводника постоянному току $R_0 = 15,48 \text{ Ом/км}$.

Значения kr для заданных частот:

- 12 кГц: $0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{12000} = 1,4$.
- 252 кГц: $0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{252000} = 6,3$.

Значения необходимых табличных функций для заданных частот:

- 12 кГц $F(kr)=0,02$; $Q(kr) = 0,99$; $G(kr)$, $H(kr)$ можно не рассчитывать, т.к. передача идет на низкой частоте;
- 252 кГц $Q(kr) = 0,443$.

Сопротивление дополнительных потерь на вихревые токи в соседних проводах и металлической оболочке:

- 12 кГц $R_M = R_{M200} \sqrt{\frac{f[\text{кГц}]}{200}} = (7,5 + 14) \sqrt{\frac{12}{200}} = 5,27 \text{ Ом/км}$.

Активное сопротивление цепи переменному току

- 12 кГц $R = 2R_0\chi[1 + F(kr)] + R_M = 2 \cdot 15,48 \cdot 1,02 \cdot [1 + 0,02] + 5,27 = 32,21 + 5,27 = 37,48 \text{ Ом/км}$.

Индуктивность:

- 12 кГц $L = \chi \left[4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = 1,02 \cdot \left[4 \ln \frac{4,09 - \frac{1,2}{2}}{\frac{1,2}{2}} + 0,99 \right] \times$
 $\times 10^{-4} = 0,819 \cdot 10^{-3} = 0,819 \text{ мГн/км}$;

- 252 кГц $L = \chi \left[4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = 1,02 \cdot \left[4 \ln \frac{4,09 - \frac{1,2}{2}}{\frac{1,2}{2}} + 0,443 \right] \times$
 $\times 10^{-4} = 0,764 \cdot 10^{-3} = 0,764 \text{ мГн/км}$.

Таким образом, были получены следующие значения первичных параметров:

- 12 кГц $R = 37,48 \text{ кГц}$; $L = 0,819 \text{ мГн/км}$; $G = 0,55 \text{ мкСм/км}$;
 - 252 кГц $R = 117,11 \text{ кГц}$; $L = 0,764 \text{ мГн/км}$; $G = 45,81 \text{ мкСм/км}$.
- Емкость $C = 24,12 \text{ нФ/км}$.

Рассчитаем волновое сопротивление.

- 12 кГц – НЧ. Используем полную формулу

Направляющие среды электросвязи

$$Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} = \sqrt{\frac{37,48 + i \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot 0,819 \cdot 10^{-3}}{0,55 \cdot 10^{-6} + i \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot 24,12 \cdot 10^{-9}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{37,48 + 61,72 \cdot i}{0,55 \cdot 10^{-6} + 18,18 \cdot 10^{-4} \cdot i}}.$$

Воспользуемся формулами расчета для комплексных чисел:

$$r_{\text{числителя}} = \sqrt{37,48^2 + 61,72^2} = 72,21, \quad \varphi_{\text{числителя}} = \arctg \frac{61,72}{37,48} = 58,73^\circ;$$

$$r_{\text{знаменателя}} = \sqrt{(0,55 \cdot 10^{-6})^2 + (18,18 \cdot 10^{-4})^2} = 18,18 \cdot 10^{-4},$$

$$\varphi_{\text{знаменателя}} = \arctg \frac{18,18 \cdot 10^{-4}}{0,55 \cdot 10^{-6}} = 89,98^\circ;$$

тогда

$$Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{72,21 \cdot e^{58,73^\circ i}}{18,18 \cdot 10^{-4} \cdot e^{89,98^\circ i}}} = \sqrt{\frac{72,21}{18,18 \cdot 10^{-4}}} \cdot e^{\frac{58,73^\circ - 89,98^\circ}{2} i} = 199,27 \cdot e^{-15,63^\circ i}.$$

- 252 кГц – ВЧ:

$$Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,764 \cdot 10^{-3}}{24,12 \cdot 10^{-9}}} = 0,17797 \cdot 10^3 = 177,97 \text{ Ом}.$$

2 Определить коэффициент затухания симметричной цепи в кабеле МКСГ 4х4х1,2, если кабель работает с системой передачи К-300. Показать, во сколько раз потери в металле больше или меньше потерь в диэлектрике. Расчеты проводить на верхней и нижней частотах передачи.

Для нахождения коэффициента затухания на частотах более 40 кГц необходимо знать все значения первичных параметров.

Из задач 1, 2 темы 2 («Первичные параметры передачи») имеем:

- индуктивность на частоте 1300 кГц $L = 0,739 \text{ мГн/км}$;
- емкость $C = 24,12 \text{ нФ/км}$.

Кроме того, из предыдущей задачи:

- диаметр изолированной жилы: $d_1 = 2,9 \text{ мм}$;
- расстояние между центрами проводников $a = 4,09 \text{ мм}$;
- диаметр группы $d_3 = 6,99 \text{ мм}$;
- сопротивление проводника постоянному току $R_0 = 15,48 \text{ Ом/км}$.

Направляющие среды электросвязи

Значения kr для заданных частот:

$$- 60 \text{ кГц: } 0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{60000} = 3,1.$$

$$- 1300 \text{ кГц: } 0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{1300000} = 14,36.$$

Значения необходимых табличных функций для заданных частот:

$$- 60 \text{ кГц: } F(kr) = 0,351; G(kr) = 0,425; H(kr) = 0,362; Q(kr) = 0,83.$$

$$- 1300 \text{ кГц: } F(kr) = \frac{\sqrt{2}kr - 3}{4} = \frac{\sqrt{2} \cdot 14,36 - 3}{4} = 4,327;$$

$$G(kr) = \frac{\sqrt{2}kr - 1}{8} = \frac{\sqrt{2} \cdot 14,36 - 1}{8} = 2,414;$$

$$H(kr) = \frac{1}{4} \left[\frac{3\sqrt{2}kr - 5}{\sqrt{2}kr - 1} - \frac{2\sqrt{2}}{kr} \right] = 0,675.$$

Сопротивление дополнительных потерь на вихревые токи в соседних проводах и металлической оболочке:

$$- 60 \text{ кГц: } R_M = R_{M200} \sqrt{\frac{f[\text{кГц}]}{200}} = (7,5 + 14) \sqrt{\frac{60}{200}} = 11,78 \text{ Ом/км};$$

$$- 1300 \text{ кГц: } R_M = R_{M200} \sqrt{\frac{f[\text{кГц}]}{200}} = (7,5 + 14) \sqrt{\frac{1300}{200}} = 54,81 \text{ Ом/км}.$$

Активное сопротивление цепи переменному току (коэффициент $p=5$)

$$- 60 \text{ кГц: } R = 2R_0 \chi \left[1 + F(kr) + \frac{pG(kr)(d/a)^2}{1 - H(kr)(d/a)^2} \right] + R_M = 2 \cdot 15,48 \cdot 1,02 \times$$

$$\times \left[1 + 0,351 + \frac{5 \cdot 0,425 \cdot \left(\frac{1,2}{4,09} \right)^2}{1 - 0,362 \cdot \left(\frac{1,2}{4,09} \right)^2} \right] + 11,78 = 48,63 + 11,78 = 60,41 \text{ Ом/км};$$

$$- 1300 \text{ кГц: } R = 2R_0 \chi \left[1 + F(kr) + \frac{pG(kr)(d/a)^2}{1 - H(kr)(d/a)^2} \right] + R_M = 2 \cdot 15,48 \times$$

$$\times 1,02 \cdot \left[1 + 4,327 + \frac{5 \cdot 2,414 \cdot \left(\frac{1,2}{4,09} \right)^2}{1 - 0,675 \cdot \left(\frac{1,2}{4,09} \right)^2} \right] + 54,81 = 203,06 + 54,81 =$$

Направляющие среды электросвязи

$$= 257,87 \text{ Ом} / \text{км} .$$

Индуктивность:

$$- 1300 \text{ кГц: } L = \chi \left[4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = 1,02 \cdot \left[4 \ln \frac{4,09 - \frac{1,2}{2}}{\frac{1,2}{2}} + \right.$$

$$\left. + 0,197 \right] \cdot 10^{-4} = 0,738 \text{ мГн} / \text{км} .$$

Значения $\text{tg} \delta$:

$$- 60 \text{ кГц: } 7 \cdot 10^{-4}$$

$$- 1300 \text{ кГц } 20 \cdot 10^{-4}$$

Проводимость изоляции:

$$- 60 \text{ кГц: } G = \frac{1}{R_{из}} + \omega C \text{tg} \delta = \frac{1}{10000 \cdot 10^6} + 2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 24,12 \cdot 10^{-9} \times$$

$$\times 7 \cdot 10^{-4} = 6,36 \text{ мкСм} / \text{км} ;$$

$$- 1300 \text{ кГц: } G = \frac{1}{R_{из}} + \omega C \text{tg} \delta = \frac{1}{10000 \cdot 10^6} + 2 \cdot 3,14 \cdot 1300 \cdot 10^3 \cdot 24,12 \times$$

$$\times 10^{-9} \cdot 20 \cdot 10^{-4} = 393,83 \text{ мкСм} / \text{км} .$$

Коэффициент затухания

$$- 60 \text{ кГц } \alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{60,41}{2} \sqrt{\frac{24,12 \cdot 10^{-9}}{0,803 \cdot 10^{-3}}} + \frac{6,36 \cdot 10^{-6}}{2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{0,803 \cdot 10^{-3}}{24,12 \cdot 10^{-9}}} = 0,166 + 0,0006 = 0,167 \text{ Нп} / \text{км} = 1,451 \text{ дБ} / \text{км} ;$$

$$- 1300 \text{ кГц: } \alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{257,87}{2} \sqrt{\frac{24,12 \cdot 10^{-9}}{0,738 \cdot 10^{-3}}} + \frac{393,83 \cdot 10^{-6}}{2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{0,738 \cdot 10^{-3}}{24,12 \cdot 10^{-9}}} = 0,737 + 0,034 = 0,772 \text{ Нп} / \text{км} = 6,709 \text{ дБ} / \text{км} .$$

Первый член в этих выражениях характеризует потери в металле, второй – потери в диэлектрике.

$$\text{На } 60 \text{ кГц соотношение потерь } \frac{\alpha_{\text{металл}}}{\alpha_{\text{диэлектрик}}} = \frac{0,166}{0,0006} = 276 .$$

$$\text{На } 1300 \text{ кГц соотношение потерь } \frac{\alpha_{\text{металл}}}{\alpha_{\text{диэлектрик}}} = \frac{0,737}{0,034} = 21,68 .$$

3 Определить, насколько отличаются коэффициенты фа-

Направляющие среды электросвязи

зы симметричных цепей в кабелях МКСГ 4х4х1,2 и МКГ 4х4х1,2, если кабели работают с системой передачи ИКМ-30. Расчеты проводить на верхней частоте системы передачи.

Для расчета коэффициента фазы на частоте 2048 кГц необходимо знать первичные параметры L и C :

Параметры кабеля МКСГ (из предыдущих задач темы):

- диаметр изолированной жилы: $d_1 = 2,9 \text{ мм}$;
- расстояние между центрами проводников $a = 4,09 \text{ мм}$;
- сопротивление проводника постоянному току: $R_0 = 15,48 \text{ Ом/км}$;
- емкость $C_{МКСГ} = 24,12 \text{ нФ/км}$.

Параметры кабеля МКГ:

- диаметр изолированной жилы:
 $d_1 = d + 2\delta + 2 \cdot 2\Delta = 1,2 + 2 \cdot 0,81 + 2 \cdot 2 \cdot 0,17 = 3,5 \text{ мм}$;
- расстояние между центрами проводников
 $a = \sqrt{2}d_1 = 1,41 \cdot 3,5 = 4,94 \text{ мм}$;
- диаметр группы $d_3 = 2,41d_1 = 2,41 \cdot 3,5 = 8,44 \text{ мм}$;
- поправочный коэффициент:

$$\Psi_3 = \frac{(d_3 + d_1 - d)^2 - a^2}{(d_3 + d_1 - d)^2 + a^2} = \frac{(8,44 + 3,5 - 1,2)^2 - 4,94^2}{(8,44 + 3,5 - 1,2)^2 + 4,94^2} = 0,651 ;$$

$$\text{- емкость } C_{МКГ} = \frac{\chi \varepsilon_r 10^{-6}}{36 \ln \left[\frac{a\Psi}{r} \right]} = \frac{1,02 \cdot 1,35 \cdot 10^{-6}}{36 \ln \left[\frac{4,94 \cdot 0,651}{0,5 \cdot 1,2} \right]} = 22,78 \text{ нФ/км} ;$$

- сопротивление проводника постоянному току совпадает с кабелем МКСГ: $R_0 = 15,48 \text{ Ом/км}$

Значение kr для заданной частоты (одинаково для обоих кабелей):

$$\text{- } 2048 \text{ кГц: } 0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{2048000} = 18 .$$

$$\text{Значения функции } Q(kr): Q(kr) = \frac{2\sqrt{2}}{kr} = 0,157 .$$

Индуктивность:

$$\text{- МКСГ: } L = \chi \left[4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = 1,02 \cdot \left[4 \ln \frac{4,09 - \frac{1,2}{2}}{\frac{1,2}{2}} + 0,157 \right] \times$$

Направляющие среды электросвязи

$$\times 10^{-4} = 0,734 \text{ мГн/км};$$

$$\text{- МКГ: } L = \chi \left[4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = 1,02 \cdot \left[4 \ln \frac{4,94 - \frac{1,2}{2}}{\frac{1,2}{2}} + 0,157 \right] \times$$

$$\times 10^{-4} = 0,823 \text{ мГн/км}.$$

Коэффициент фазы:

$$\text{- МКСГ: } \beta = \omega \sqrt{LC} = 2 \cdot 3,14 \cdot 2048 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{24,12 \cdot 10^{-9} \cdot 0,734 \cdot 10^{-3}} =;$$

$$= 54,12 \text{ рад/км};$$

$$\text{- МКГ: } \beta = \omega \sqrt{LC} = 2 \cdot 3,14 \cdot 2048 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{22,78 \cdot 10^{-9} \cdot 0,823 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 55,69 \text{ рад/км};$$

Разность коэффициентов фазы

$$\beta_{МКГ} - \beta_{МКСГ} = 55,69 - 54,12 = 1,57 \text{ рад/км}.$$

4 Определить, насколько быстрее движется высокочастотная составляющая сигнала по сравнению с низкочастотной составляющей по симметричной цепи в кабеле МКСГ 4х4х1,2, если кабель работает с системой передачи К-60.

Воспользуемся результатами расчетов из задачи 1:

Активное сопротивление цепи переменному току

$$\text{- 12 кГц } R = 37,48 \text{ Ом/км}.$$

$$\text{- 252 кГц } R = 117,11 \text{ Ом/км}$$

Индуктивность:

$$\text{- 12 кГц } L = 0,819 \text{ мГн/км}.$$

$$\text{- 252 кГц } L = 0,764 \text{ мГн/км}.$$

Емкость $C = 24,12 \text{ нФ/км}.$

Проводимость изоляции:

$$\text{- 12 кГц } G = 0,55 \text{ мкСм/км}.$$

$$\text{- 252 кГц } G = 45,81 \text{ мкСм/км}.$$

Для расчетов скорости распространения воспользуемся следующими формулами:

$$\text{- 12 кГц } v = \frac{\omega}{\beta}, \text{ где } \beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (\omega^2 LC - RG) \right]};$$

$$- 252 \text{ кГц } v = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

$$\text{На } 12 \text{ кГц: } \beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (\omega^2 LC - RG) \right]} =$$

$$= 0,349 \text{ рад/км, тогда}$$

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 12 \cdot 10^3}{0,349} = 215,93 \cdot 10^3 \text{ км/с}.$$

На 252 кГц:

$$v = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{0,764 \cdot 10^{-3} \cdot 24,12 \cdot 10^{-9}}} = 232,95 \cdot 10^3 \text{ км/с}.$$

Разность скоростей:

$$\Delta v = v_{252} - v_{12} = 232,95 \cdot 10^3 - 215,93 \cdot 10^3 = 17,02 \cdot 10^3 \text{ км/с}.$$

4.2 Задачи для самостоятельного решения

1 Определить минимальное и максимальное значения волнового сопротивления электромагнитной волне, проходящей по симметричной паре кабеля МКГ 4х4х1,2, если кабель работает с системой передачи КАМА.

2 Определить значение волнового сопротивления электромагнитной волне, проходящей по симметричной цепи кабеля МКГ 1х4х1,2. Расчеты проводить для постоянного тока.

3 Определить коэффициент затухания в симметричной цепи в кабеле МКСГ 4х4х1,2, если в первом случае кабель находится в среде с температурой +20°C, во втором – в среде с температурой -30°C. По симметричной цепи работает система передачи К-60. Расчет проводить на верхней и нижней частотах передаваемых сигналов.

4 Определить коэффициент фазы симметричной цепи в кабеле МКГ 4х4х1,2, если кабель работает с системой передачи К-60. Расчеты проводить на нижней частоте системы передачи.

5 Определить, насколько отличается скорость движения низкочастотной составляющей сигнала по симметричной цепи в кабеле МКСГ 4х4х1,2 от скорости движения низкочастотной составляющей сигнала по симметричной цепи в кабеле МКГ 4х4х1,2,

если кабели работают в системе передачи К-60.

6 Определить, насколько отличаются волновые сопротивления в кабеле МКСГ 4х4х1,2 от коэффициента затухания в кабеле МКСГ 4х4х1,05, если кабели работают в системе передачи ИКМ-30. Расчеты проводить на верхней частоте системы передачи.

7 Определить, насколько отличается скорость движения низкочастотной составляющей сигнала по симметричной цепи в кабеле МКГ 4х4х1,2 от скорости движения низкочастотной составляющей сигнала по симметричной цепи в кабеле МКГ 4х4х1,05, если кабели работают с системой передачи К-60. Расчеты проводить на верхней и нижней частотах передаваемых сигналов.

8 Определить минимальное и максимальное значения волнового сопротивления электромагнитной волне, проходящей по симметричной паре кабеля МКСГ 4х4х1,05, если кабель работает с системой передачи К-60.

9 Определить минимальное и максимальное значения волнового сопротивления электромагнитной волне, проходящей по симметричной паре кабеля МКСАШп 4х4х1,2, если кабель работает с системой передачи К-60.

5 Вторичные параметры передачи воздушных линий

5.1 Решение типовых задач

1 Определить минимальное и максимальное значения волнового сопротивления электромагнитной волне, проходящей по первой цепи профиля №1 воздушной линии связи из стальных проводников диаметром 4 мм, если кабель работает с системой передачи В-3-3. Расчет проводить для сухой погоды.

Для расчета волнового на верхней и нижней частоте системы передачи В-3-3 необходимо знать все первичные параметры передачи.

Расстояние между проводами цепи 1 профиля №1 составляет 60 см.

Направляющие среды электросвязи

Из задач 1, 3 и 4 темы 3:

- 4 кГц: $R = 79,55 \text{ Ом/км}$, $G = 0,21 \text{ мкСм/км}$;
- 31 кГц: $R = 210,08 \text{ Ом/км}$; $G = 1,56 \text{ мкСм/км}$;
- $C = 4,87 \text{ нФ/км}$.

Кроме того, значения коэффициента $Q(kr)$:

- 4 кГц $Q(kr) = 0,296$;
- 31 кГц $Q(kr) = \frac{2\sqrt{2}}{kr} = \frac{2 \cdot 1,41}{26,4} = 0,107$.

Индуктивность для стальных проводов:

- 4 кГц $L = \left[4 \ln \frac{a}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = \left[4 \ln \frac{60 \cdot 10}{2} + 130 \cdot 0,296 \right] \times 10^{-4} = 6,13 \text{ мГн / км}$;
- 31 кГц $L = \left[4 \ln \frac{a}{r} + \mu_r Q(kr) \right] \cdot 10^{-4} = \left[4 \ln \frac{60 \cdot 10}{2} + 130 \cdot 0,107 \right] \times 10^{-4} = 3,67 \text{ мГн / км}$.

Волновое сопротивление:

- 4 кГц: $Z_e = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} = \sqrt{\frac{79,55 + i \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 6,13 \cdot 10^{-3}}{0,21 \cdot 10^{-6} + i \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 4,87 \cdot 10^{-9}}} =$
 $= \sqrt{\frac{79,55 + i \cdot 153,99}{0,21 \cdot 10^{-6} + i \cdot 1,22 \cdot 10^{-4}}} = \sqrt{\frac{173,32 \cdot \exp(62,68^\circ i)}{1,22 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(89,9^\circ i)}} =$
 $= 1190,28 \cdot e^{-13,61i} \text{ Ом};$
- 31 кГц: $Z_e = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} = \sqrt{\frac{210,08 + i \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 10^3 \cdot 3,67 \cdot 10^{-3}}{1,56 \cdot 10^{-6} + i \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 10^3 \cdot 4,87 \cdot 10^{-9}}} =$
 $= \sqrt{\frac{210,08 + i \cdot 714,48}{1,56 \cdot 10^{-6} + i \cdot 9,48 \cdot 10^{-4}}} = \sqrt{\frac{744,72 \cdot \exp(73,61^\circ i)}{9,48 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(89,91^\circ i)}} =$
 $= 886,28 \cdot e^{-8,15i} \text{ Ом}.$

2 Определить коэффициент затухания в первой цепи профиля №2 из стальных проводников диаметром 4 мм, если кабель работает в сухую погоду с системой передачи В-З-З. Как изменится этот показатель, если заменить провода медными с тем же диаметром? Расчет проводить на верхней и нижней частотах передаваемого сигнала.

Расстояние между проводами цепи 20 см. Воспользуемся

Направляющие среды электросвязи

данными, полученными при решении задач темы 3:

$C = 6,03 \text{ нФ/км};$

4 кГц: $G = 0,21 \text{ мСм/км};$ 31 кГц: $G = 1,56 \text{ мСм/км};$

для стальных проводов:

- 4 кГц: $R = 79,55 \text{ Ом/км}; L = 5,69 \text{ мГн/км};$

- 31 кГц: $R = 210,08 \text{ Ом/км}; L = 3,23 \text{ мГн/км};$

для медных проводов:

- 4 кГц: $R = 3,42 \text{ Ом/км}; L = 1,93 \text{ мГн/км};$

- 31 кГц: $R = 8,04 \text{ Ом/км}; L = 1,88 \text{ мГн/км}.$

Коэффициент затухания

стальные проводники:

$$\text{- 4 кГц: } \alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right]} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{2,68 \cdot 10^4 \cdot 2,29 \cdot 10^{-8}} - 0,02 \right]} = 0,04 \text{ Нн/км};$$

$$\text{- 31 кГц: } \alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right]} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{4,4 \cdot 10^5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-6}} - 0,74 \right]} = 0,14 \text{ Нн/км};$$

медные проводники:

$$\text{- 4 кГц: } \alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right]} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{2,36 \cdot 10^3 \cdot 2,29 \cdot 10^{-8}} - 7,34 \cdot 10^{-3} \right]} = 0,003 \text{ Нн/км};$$

$$\text{- 31 кГц: } \alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right]} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1,34 \cdot 10^5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-6}} - 0,43 \right]} = 0,008 \text{ Нн/км}.$$

Разность коэффициентов затухания:

- 4 кГц: $\Delta\alpha = 0,04 - 0,003 = 0,037 \text{ Нн/км};$

- 31 кГц: $\Delta\alpha = 0,14 - 0,008 = 0,132 \text{ Нн/км}.$

3 Определить коэффициент фазы в четвертой цепи профиля №2а из стальных проводников диаметром 4 мм, если кабель работает в сухую погоду с системой передачи В-3-3. Как изменится этот показатель для системы передачи В-2-2? Расчет проводить

на верхней и нижней частотах передаваемого сигнала.

Расстояние между проводами данной цепи 20 см. Воспользуемся данными, полученными при решении задач темы 3:

$C = 6,03 \text{ нФ/км}$.

В-3-3:

- 4кГц: $R = 79,55 \text{ Ом}$; $L = 5,69 \text{ мГн/км}$; $G = 0,21 \text{ мкСм/км}$.

- 31 кГц: $R = 210,08 \text{ Ом}$; $L = 3,23 \text{ мГн/км}$; $G = 1,56 \text{ мкСм/км}$.

В-2-2:

- 4,5 кГц: $R = 83,44 \text{ Ом}$; $L = 5,48 \text{ мГн/км}$.

- 25,7 кГц: $R = 191,77 \text{ Ом}$; $L = 3,36 \text{ мГн/км}$.

Рассчитаем проводимость изоляции для В-2-2:

- 4,5 кГц $G = G_0 + nf = 0,01 \cdot 10^{-6} + 0,05 \cdot 10^{-9} \cdot 4,5 \cdot 10^3 = 0,24 \text{ мкСм/км}$;

- 25,7 кГц $G = G_0 + nf = 0,01 \cdot 10^{-6} + 0,05 \cdot 10^{-9} \cdot 25,7 \cdot 10^3 = 1,3 \text{ мкСм/км}$.

Коэффициент фазы для В-3-3:

$$\begin{aligned} \text{- 4 кГц: } \beta &= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (\omega^2 LC - RG) \right]} = \\ &= 0,15 \text{ рад/км}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- 31 кГц: } \beta &= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (\omega^2 LC - RG) \right]} = \\ &= 0,87 \text{ рад/км}. \end{aligned}$$

Коэффициент фазы для В-2-2:

$$\begin{aligned} \text{- 4,5 кГц: } \beta &= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (\omega^2 LC - RG) \right]} = \\ &= 0,17 \text{ рад/км}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- 25,7 кГц: } \beta &= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (\omega^2 LC - RG) \right]} = \\ &= 0,74 \text{ рад/км}. \end{aligned}$$

Разница показателей:

- нижние частоты: $\Delta\beta = 0,17 - 0,15 = 0,02 \text{ рад/км}$;

- верхние частоты: $\Delta\beta = 0,74 - 0,87 = -0,13 \text{ рад/км}$.

4 Определить, насколько отличается скорость движения низкочастотной от высокочастотной составляющей сигнала по четвертой цепи профиля №2а из стальных проводников диаметром 4 мм, если кабель работает в сухую погоду с системой передачи В-3-3?

При расчете скорости движения как низкочастотной, так и высокочастотной составляющей спектра необходимо пользоваться формулой $v = \frac{\omega}{\beta}$.

Воспользуемся данными, полученными при решении задач темы 3:

- 4 кГц: $\beta = 0,15 \text{ рад/км}$; - 31 кГц: $\beta = 0,87 \text{ рад/км}$.

$$\text{- 4 кГц: } v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^3}{0,15} = 167,47 \cdot 10^3 \text{ км/с};$$

$$\text{- 31 кГц: } v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 10^3}{0,87} = 223,77 \cdot 10^3 \text{ км/с}.$$

$$\begin{aligned} \text{Разница скоростей } \Delta v &= 223,77 \cdot 10^3 - 167,47 \cdot 10^3 = \\ &= 56,3 \cdot 10^3 \text{ км/с}. \end{aligned}$$

5.2 Задачи для самостоятельного решения

1 Определить минимальное и максимальное значения волнового сопротивления электромагнитной волне, проходящей по первой цепи профиля №1 из медных проводников диаметром 4 мм, для сухой и сырой погоды. Кабель работает с системой передачи В-3-3.

2 Определить коэффициент затухания в первой цепи профиля №2 из медных проводников диаметром 4 мм, если кабель работает в сухую погоду с системой передачи В-12-2. Как изменится данный показатель в сырую погоду? Расчет проводить на верхней и нижней частотах передаваемого сигнала.

3 Определить коэффициент фазы в пятой цепи профиля №2а из стальных проводников диаметром 4 мм, если кабель работает в сырую погоду с системой передачи В-3-3. Как изменится данный показатель, если заменить провода медными с тем же диаметром? Расчет проводить на верхней и нижней частотах передаваемого сигнала.

4 Определить, насколько отличается скорость движения низкочастотной составляющей сигнала по первой цепи профиля №2 из медных проводников диаметром 4 мм, если в первом слу-

Направляющие среды электросвязи

чае кабель работает с системой передачи В-3-3, а во втором – с системой В-12-2? Расчет проводить при сухой погоде.

5 Определить, насколько отличается скорость движения низкочастотной от высокочастотной составляющей сигнала по первой цепи профиля №2 из медных проводников диаметром 4 мм, если кабель работает в сырую погоду с системой передачи В-12-2?

КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ СВЯЗИ

1 Первичные параметры передачи

1.1 Решение типовых задач

1 Сравнить расчетные данные сопротивления коаксиальной пары в кабеле МКТ-4 1,2/4,6, полученные по полным и упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи К-300. Расчеты проводить на нижней частоте передаваемых сигналов.

Упрощенная формула для двух медных проводников:

$$R = 0,0835 \sqrt{f} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) = 0,0835 \sqrt{60 \cdot 10^3} \left(\frac{1}{1,2} + \frac{1}{4,6} \right) = 21,49 \text{ Ом/км}.$$

Расчет по полной формуле.

Внутренний проводник:

- значение $kr = 0,0105d \sqrt{f} = 0,0105 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{60000} = 3,1$, $F(kr) = 0,351$;

- сопротивление постоянному току:

$$R_{0a} = \frac{4000 \rho_a}{\pi d_a^2} = \frac{4000 \cdot 0,0175}{3,14 \cdot 1,2^2} = 15,48 \text{ Ом/км};$$

- сопротивление переменному току:

$$R_a = R_{0a} [1 + F(k_a r_a)] = 15,48 \cdot [1 + 0,351] = 20,92 \text{ Ом/км}$$

Внешний проводник:

- коэффициент вихревых токов $k = 0,021 \sqrt{f} = 0,021 \cdot \sqrt{60000} = 5,14$,

откуда $u = \sqrt{2}kt = 1,41 \cdot 5,14 \cdot 0,1 = 0,725$.

- сопротивление переменному току

$$R_b = \frac{10^3}{2\pi r_b \sigma_b} \left[\frac{k_b}{\sqrt{2}} \frac{\text{sh } u + \sin u}{\text{ch } u - \cos u} - \frac{4r_b + t}{8(r_b + t)r_b} \right] = \frac{10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,3 \cdot 57} \times$$

$$\times \left[\frac{5,14}{1,41} \frac{0,79 + 0,66}{1,28 - 0,75} - \frac{4 \cdot 2,3 + 0,1}{8 \cdot (2,3 + 0,1) \cdot 2,3} \right] = 11,98 \text{ Ом/км}.$$

Общее сопротивление $R = R_a + R_b = 20,92 + 11,98 = 32,9 \text{ Ом/км}$.

Разность сопротивлений: $\Delta R = 32,9 - 21,49 = 11,41 \text{ Ом/км}$.

Таким образом, при расчете по упрощенной формуле было получено значение, на 11,41 Ом/км меньшее, чем по полной формуле.

2 При эксплуатации магистрали, использующей кабель МКТ-

4 1,2/4,6, была изменена схема дистанционного питания, в результате чего напряжение постоянного тока было подключено к внутреннему и внешнему проводникам одной коаксиальной пары. Найти сопротивление новой цепи дистанционного питания.

Сопротивление внутреннего проводника постоянному току (из задачи 1): $R_{0a} = 15,48 \text{ Ом/км}$.

Сопротивление постоянному току внешнего проводника, поверх которого наложен экран: $R_{0b} = \frac{R_m R_g}{R_m + R_g}$, где

- сопротивление внешнего медного проводника

$$R_m = \frac{1000 \rho_m}{\pi(D+t)t} = \frac{1000 \cdot 0,0175}{3,14 \cdot (4,6 + 0,1) \cdot 0,1} = 11,86 \text{ Ом/км};$$

- сопротивление экрана

$$R_g = \frac{1000 \cdot 0,138}{3,14 \cdot (4,6 + 0,1 + 0,1) \cdot 0,1 \cdot 2} = 45,78 \text{ Ом/км};$$

$$\text{тогда } R_{0b} = \frac{11,86 \cdot 45,78}{11,86 + 45,78} = 9,42 \text{ Ом/км}.$$

Общее сопротивление коаксиальной пары постоянному току $R_0 = R_{0a} + R_{0b} = 15,92 + 9,42 = 24,9 \text{ Ом/км}$.

3 Сравнить расчетные данные индуктивности коаксиальной пары в кабеле ВКПАШп-1 2,1/9,7, полученные по полным и упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи К-120. Расчеты проводить на нижней частоте передаваемых сигналов.

Упрощенная формула расчета индуктивности, если внутренний проводник медный, внешний – алюминиевый:

$$L = \left[\left(\frac{133,3}{\sqrt{f}d} + \frac{172}{\sqrt{f}D} \right) + 2 \ln \left(\frac{D}{d} \right) \right] \cdot 10^{-4} = \left[\left(\frac{133,3}{\sqrt{60000} \cdot 2,1} + \frac{172}{\sqrt{60000} \cdot 9,7} \right) + 2 \ln \left(\frac{9,7}{2,1} \right) \right] \cdot 10^{-4} = 3,39 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}.$$

Полная формула расчета индуктивности.

Внутренний проводник:

- значение $kr = 0,0105d\sqrt{f} = 0,0105 \cdot 2,1 \cdot \sqrt{60000} = 5,4$, $Q(kr) = 0,516$;

Направляющие среды электросвязи

$$- L_a = \frac{1}{2} \mu_r Q(kr) \cdot 10^{-4} = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 0,516 \cdot 10^{-4} = 0,258 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}.$$

Внешний проводник:

$$- k = 0,0164 \sqrt{f} = 0,0164 \cdot \sqrt{60000} = 4,02, \text{ откуда}$$

$$u = \sqrt{2kt} = 1,41 \cdot 4,02 \cdot 0,8 = 4,531.$$

$$- L_{\sigma} = \frac{10^3}{2\pi r_b \sigma} \frac{k_b}{\sqrt{2\omega}} \frac{\operatorname{sh} u - \sin u}{\operatorname{ch} u - \cos u} = \frac{10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,85 \cdot 34,36} \frac{4,02}{1,41 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 60000} \times \\ \times \frac{46,4 + 0,98}{46,5 + 0,18} = 0,735 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/км}.$$

Внешняя межпроводниковая индуктивность:

$$L_{\text{вн}} = 2\mu_r \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 1 \cdot \ln\left(\frac{9,7}{2,1}\right) \cdot 10^{-4} = 3,06 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}.$$

Общая индуктивность:

$$L = L_a + L_b + L_{\text{вн}} = 0,258 \cdot 10^{-4} + 0,735 \cdot 10^{-5} + 3,06 \cdot 10^{-4} = 3,39 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}.$$

Разность индуктивностей:

$$\Delta L = 3,39 \cdot 10^{-4} - 3,39 \cdot 10^{-4} = 0 \text{ Гн/км}.$$

Таким образом, при расчете по упрощенной и полной формулам были получены одинаковые с точностью до округления значения.

4 При изготовлении пары для кабеля КМ-4 2,6/9,5 был сбой в набивке изоляционных шайб. В результате этого расстояние между шайбами стало равным 35 мм. Определить, насколько изменилась емкость коаксиальной пары.

Емкость коаксиальной пары с нормальной изоляцией:

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln\left(\frac{D}{d}\right)} = \frac{1,13 \cdot 10^{-6}}{18 \ln\left(\frac{9,5}{2,6}\right)} = 48,45 \text{ нФ/км}.$$

Емкость дефектной пары:

- ε_r полиэтилена равна 2,1, воздуха 1;

$$- \varepsilon_s = \frac{\varepsilon_r b + \varepsilon_o a}{a + b} = \frac{1 \cdot 35 + 2,1 \cdot 2,2}{2,2 + 35} = 1,07;$$

Направляющие среды электросвязи

$$- C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left(\frac{D}{d} \right)} = \frac{1,07 \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left(\frac{9,5}{2,6} \right)} = 45,66 \text{ нФ/км}.$$

Разность емкостей: $\Delta C = 48,45 \cdot 10^{-9} - 45,66 \cdot 10^{-9} = 2,79 \text{ нФ/км}.$

Таким образом, емкость пары с нестандартной изоляцией уменьшилась на 2,79 нФ/км.

5 Определить, насколько отличаются проводимости изоляции коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6, если по коаксиальной паре 2,6/9,5 мм работает система передачи К-1920, а по паре 1,2/4,6 мм – система передачи К-300. Расчеты проводить на верхней частоте передаваемых сигналов.

Проводимость изоляции средней пары (2,6/9,5).

- емкость $C = 48,45 \text{ нФ/км}$ (задача 4);

- на частоте 8500 кГц: $\text{tg} \delta \approx 0,7 \cdot 10^{-4}$;

$$- G = \frac{1}{R_{из}} + \omega C \text{tg} \delta = \frac{1}{10000 \cdot 10^6} + 2 \cdot 3,14 \cdot 8500000 \cdot 48,45 \cdot 10^{-9} \cdot 0,7 \times 10^{-4} = 181,03 \text{ мкСм/км}.$$

Проводимость изоляции малогабаритной пары (1,2/4,6).

- эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции $\varepsilon = 1,22$;

$$- \text{емкость } C = \frac{\varepsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left(\frac{D}{d} \right)} = \frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left(\frac{4,6}{1,2} \right)} = 50,44 \text{ нФ/км};$$

- на частоте 1300 кГц: $\text{tg} \delta \approx 1,2 \cdot 10^{-4}$;

$$- G = \frac{1}{R_{из}} + \omega C \text{tg} \delta = \frac{1}{10000 \cdot 10^6} + 2 \cdot 3,14 \cdot 1300000 \cdot 50,44 \cdot 10^{-9} \cdot 1,2 \times 10^{-4} = 49,42 \text{ мкСм/км}.$$

Разность проводимостей изоляции:

$$\Delta G = 181,03 \cdot 10^{-6} - 49,42 \cdot 10^{-6} = 131,61 \text{ мкСм/км}.$$

Таким образом, проводимость изоляции средней пары на 131,61 кСм/км больше проводимости изоляции малогабаритной пары.

1.2 Задачи для самостоятельного решения

1 Сравнить расчетные данные сопротивления коаксиальной пары в кабеле ВКПАШп-1 2,1/9,7, полученные по полным и упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи К-120. Расчеты проводить на нижней частоте передаваемых сигналов.

2 Сравнить расчетные данные сопротивления коаксиальной пары 2,6/9,5 кабеля КМ-8/6, полученные по полным и упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи ИКМ-1920. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

➤ **Указание:** полутактовая частота примерно равна половине скорости передачи системы передачи. Например, если скорость передачи 2,048 Мбит/с, то полутактовая частота приблизительно равна 1,024 МГц.

3 При эксплуатации магистрали, использующей кабель КМ-4 2,6/9,5, была изменена схема дистанционного питания, в результате чего напряжение постоянного тока было подключено к внутреннему и внешнему проводникам одной коаксиальной пары. Найти сопротивление новой цепи дистанционного питания.

4 Сравнить расчетные данные индуктивности коаксиальной пары в кабеле МКТ-4 1,2/4,6, полученные по полным и упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи К-3000. Расчеты проводить на нижней частоте передаваемых сигналов.

5 Сравнить расчетные данные индуктивности коаксиальной пары 2,6/9,5 мм кабеля КМ-8/6, полученные по полным и упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи ИКМ-1920. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

6 При изготовлении коаксиальной пары для кабеля КМ-4 2,6/9,5 были использованы изоляционные шайбы нестандартного материала с $\varepsilon=3,1$. Определить, насколько изменилась емкость коаксиальной пары.

7 При изготовлении пары для кабеля КМ-4 2,6/9,5 был сбой в набивке изоляционных шайб. В результате этого расстояние между шайбами стало равным 35 мм. Определить, насколько из-

Направляющие среды электросвязи

менилась проводимость изоляции коаксиальной пары. По кабелю работает система передачи К-1920. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

8 Определить, насколько отличаются проводимости изоляции коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6, если по коаксиальной паре 2,6/9,5 мм работает система передачи К-1920, а по паре 1,2/4,6 мм – система передачи ИКМ-480. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

2 Вторичные параметры передачи

2.1 Решение типовых задач

1 Определить, насколько отличаются волновые сопротивления коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6, если по коаксиальной паре 2,6/9,5 мм работает система передачи К-3600, а по паре 1,2/4,6 мм – система передачи К-300. Расчеты проводить на верхней частоте передаваемых сигналов.

Средняя пара, К-3600 (17600 кГц):

$$Z_{\text{с}} = \frac{1}{2\pi} Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} 376,6 \cdot \sqrt{\frac{1}{1,13}} \ln \frac{9,5}{2,6} = 73,1 \text{ Ом}.$$

Малогабаритная пара, К-300 (1300 кГц): $Z_{\text{с}} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$

Из задачи 5 ПЗ06: $C = 50,44 \text{ нФ/км}.$

$$\begin{aligned} \text{На частоте 1300 кГц } L &= \left[\frac{133,3}{\sqrt{f}} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) + 2 \ln \left(\frac{D}{d} \right) \right] \cdot 10^{-4} = \\ &= \left[\frac{133,3}{\sqrt{1300000}} \left(\frac{1}{1,2} + \frac{1}{4,6} \right) + 2 \ln \left(\frac{4,6}{1,2} \right) \right] \cdot 10^{-4} = 2,81 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}. \end{aligned}$$

$$Z_{\text{с}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{2,81 \cdot 10^{-4}}{50,44 \cdot 10^{-9}}} = 74,64 \text{ Ом}.$$

Разность волновых сопротивлений:

$$\Delta Z_{\text{с}} = 74,64 - 73,1 = 1,54 \text{ Ом}.$$

Таким образом, волновое сопротивление малогабаритной пары на 1,54 Ом больше волнового сопротивления средней пары.

Направляющие среды электросвязи

2 Сравнить расчетные данные затухания коаксиальной пары в кабеле МКТ-4 1,2/4,6, полученные по полным и упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи К-300. Расчеты проводить на верхней частоте передаваемых сигналов.

Полная формула: для расчета необходимо знать все первичные параметры передачи пары.

$$R = 0,0835 \sqrt{f} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) = 0,0835 \sqrt{1300000} \left(\frac{1}{1,2} + \frac{1}{4,6} \right) = 100,03 \text{ Ом/км};$$

$$L = 2,81 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км (из задачи 1);}$$

$$C = 50,44 \text{ нФ/км (задача 5, ПЗ06);}$$

$$G = \frac{1}{R_{из}} + \omega C \operatorname{tg} \delta = 10^{-10} + 2 \cdot 3,14 \cdot 1300 \cdot 10^3 \cdot 50,44 \cdot 10^{-9} \cdot 1,2 \cdot 10^{-4} =$$

$$= 49,42 \text{ мкСм/км};$$

$$\alpha = 8,69 \left[\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right] = 8,69 \left[\frac{100,03}{2} \sqrt{\frac{50,44 \cdot 10^{-9}}{2,81 \cdot 10^{-4}}} + \frac{49,42 \cdot 10^{-6}}{2} \times \right.$$

$$\left. \times \sqrt{\frac{2,81 \cdot 10^{-4}}{50,44 \cdot 10^{-9}}} \right] = 8,69 \cdot 0,67 = 5,84 \text{ (дБ/км)}.$$

Упрощенная формула:

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

$$= \frac{6,05 \sqrt{1300000 \cdot 1,22}}{\ln \frac{4,6}{1,2}} \left(\frac{1}{1,2} + \frac{1}{4,6} \right) \cdot 10^{-3} + 9,08 \cdot 1300000 \sqrt{1,22} \cdot 1,2 \cdot 10^{-4} \times$$

$$\times 10^{-5} = 5,97 \text{ (дБ/км)}$$

Разность коэффициентов затухания:

$$\Delta \alpha = 5,97 - 5,84 = 0,13 \text{ дБ/км}.$$

Таким образом, по упрощенной формуле значение коэффициента затухания получилось на 0,13 дБ/км большим, чем по полной формуле.

3 Определить, во сколько раз отличается коэффициент фазы коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6, если по коаксиальной паре 2,6/9,5 мм работает система передачи

Направляющие среды электросвязи

ИКМ-1920, а по паре 1,2/4,6 мм – система передачи К-300. Расчеты проводить на верхней частоте передаваемых сигналов.

Средняя пара, ИКМ-1920 (140 000 кГц):

$$\beta = \omega \frac{\sqrt{\epsilon_0}}{c} = 2 \cdot 3,14 \cdot 140\,000\,000 \frac{\sqrt{1,13}}{300\,000} = 3115,34 \text{ рад/км}.$$

Малогабаритная пара, К-300 (1300 кГц): $\beta = \omega \sqrt{LC}.$

$L = 2,81 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$ (из задачи 1); $C = 50,44 \text{ нФ/км}$ (задача 5 предыдущей темы).

$$\beta = \omega \sqrt{LC} = 2 \cdot 3,14 \cdot 1300\,000 \cdot \sqrt{2,81 \cdot 10^{-4} \cdot 50,44 \cdot 10^{-9}} = 30,74 \text{ рад/км}.$$

Отношение коэффициентов фазы:

$$\frac{\beta_{\text{ИКМ-19200}}}{\beta_{\text{К-300}}} = \frac{3115,34}{30,74} = 101,3.$$

Таким образом, коэффициент фазы средней пары в 101,3 раза больше коэффициента фазы малогабаритной пары.

4 Определить, насколько быстрее движется высокочастотная составляющая сигнала по сравнению с низкочастотной составляющей по коаксиальной паре в кабеле КМ-4 2,6/9,5 мм, если кабель работает с системой передачи К-1920.

$$\text{ВЧ (8500 кГц): } v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_0}} = \frac{300\,000}{\sqrt{1,13}} = 282216,26 \text{ км/с}.$$

$$\text{НЧ (312 кГц): } v = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

$$L = \left[\frac{133,3}{\sqrt{f}} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) + 2 \ln \left(\frac{D}{d} \right) \right] \cdot 10^{-4} = \left[\frac{133,3}{\sqrt{312000}} \left(\frac{1}{2,6} + \frac{1}{9,5} \right) + 2 \ln \left(\frac{9,5}{2,6} \right) \right] \cdot 10^{-4} = 2,71 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км};$$

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left(\frac{D}{d} \right)} = \frac{1,13 \cdot 10^{-6}}{18 \ln \left(\frac{9,5}{2,6} \right)} = 48,45 \text{ нФ/км};$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{2,71 \cdot 10^{-4} \cdot 48,45 \cdot 10^{-9}}} = 276058,34 \text{ км/с}.$$

Разница скоростей: $\Delta v = 282216,26 - 276058,34 = 6157,92 \text{ км/с}.$

2.2 Задачи для самостоятельного решения

1 Определить, насколько отличаются волновые сопротивления коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6 и МКТ-4 1,2/4,6, если по коаксиальной паре 2,6/9,5 мм кабеля КМ-8/6 работает система передачи ИКМ-1920, а по паре 1,2/4,6 мм кабеля МКТ-4 – система передачи ИКМ-480. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

2 Определить, насколько отличаются волновые сопротивления коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6 и ВКПАШп-1 2,1/9,7, если по коаксиальной паре 2,6/9,5 мм кабеля КМ-8/6 работает система передачи ИКМ-1920, а по кабелю ВКПАШп-1 – система передачи К-120. Расчеты проводить на верхней частоте передаваемых сигналов.

3 Сравнить расчетные данные затухания коаксиальной пары в комбинированном кабеле КМ-8/6, полученные по полным и упрощенным формулам. По коаксиальной паре 2,6/9,5 мм работает система передачи ИКМ-1920. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

4 Сравнить расчетные данные затухания коаксиальной пары в кабеле ВКПАШп-1 2,1/9,7, полученные по полным и упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи К-120. Расчеты проводить на верхней частоте передаваемых сигналов.

5 Определить, во сколько раз отличается коэффициент фазы коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6, если по коаксиальной паре 2,6/9,5 мм работает система передачи К-3600, а по паре 1,2/4,6 мм – система передачи ИКМ-480. Расчеты проводить на верхней частоте передаваемых сигналов.

6 Определить, во сколько раз отличается коэффициент фазы коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6, если по коаксиальной паре 2,6/9,5 мм работает система передачи ИКМ-

1920, а по паре 1,2/4,6 мм – система передачи ИКМ-480. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

7 Определить, насколько быстрее движется высокочастотная составляющая сигнала по сравнению с низкочастотной составляющей по коаксиальной паре в кабеле ВКПАШп-1 2,1/9,7, если кабель работает с системой передачи К-120.

8 Определить, насколько быстрее движется высокочастотная составляющая сигнала по сравнению с низкочастотной составляющей по коаксиальной паре в кабеле МКТ-4 1,2/4,6, если кабель работает с системой передачи К-300.

3 Влияние соотношения размеров проводников на параметры передачи

3.1 Решение типовых задач

1 Определить, каким должно быть расстояние между полиэтиленовыми шайбами толщиной 2,2 мм в коаксиальной паре 2,6/9,4 мм с волновым нормированным сопротивлением в 75 Ом.

Отношение размеров проводников: $\frac{D}{d} = \frac{9,4}{2,6} = 3,6$. При таком соотношении диаметров для $Z_{\text{в}} = 75 \text{ Ом}$ $\epsilon_3 = 1,05$.

Формула для вычисления эквивалентной диэлектрической проницаемости при шайбовой изоляции $\epsilon_3 = \frac{\epsilon_6 b + \epsilon_0 a}{a + b}$, откуда найдем расстояние между шайбами изоляции, b :

$$\begin{aligned}\epsilon_3 a + \epsilon_6 b &= \epsilon_0 b + \epsilon_0 a, \\ (\epsilon_3 - \epsilon_0) b &= (\epsilon_0 - \epsilon_3) a, \\ b &= \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_3) a}{\epsilon_3 - \epsilon_0}.\end{aligned}$$

Отсюда имеем $b = \frac{(2,1 - 1,05) \cdot 2,2}{1,05 - 1} = 46,2 \text{ мм}$.

2 Какое минимальное затухание может быть достигнуто в коаксиальных парах на верхней частоте аппаратуры К-3600, если известно, что диаметр внутреннего проводника равен 2,6 мм, оба

проводника медные, а волновое сопротивление равно 75 Ом?

Минимальное затухание в коаксиальных парах достигается при соотношении $D/d=3,6$ мм. Отсюда $D = 3,6d = 3,6 \cdot 2,6 = 9,36$ мм.

При соотношении диаметров 3,6 волновое сопротивление в 75 Ом достигается при $\epsilon_3=1,05$.

Верхняя частота системы передачи К-3600 равна 17 600 кГц, на такой частоте коэффициент затухания равен

$$\alpha = \alpha_m = \frac{21,7 \sqrt{f \epsilon_3} \cdot 10^{-3}}{D} = \frac{21,7 \sqrt{17\,600\,000 \cdot 1,05} \cdot 10^{-3}}{9,36} = 9,97 \text{ дБ/км}.$$

3.2 Задачи для самостоятельного решения

1 Определить, каким должно быть расстояние между полиэтиленовыми шайбами толщиной 2 мм в коаксиальной паре 2,6/9,4 мм с волновым нормированным сопротивлением 75 Ом.

2 Какое минимальное затухание может быть достигнуто в коаксиальных парах на полутактовой частоте аппаратуры ИКМ-30, если известно, что диаметр внутреннего проводника равен 2,6 мм, оба проводника медные, а волновое сопротивление равно 75 Ом?

3 Найти коэффициент фазы и скорость распространения электромагнитной энергии в коаксиальном кабеле с медными проводниками, рассчитанном на передачу сигналов с минимальным затуханием, если кабель имеет нормированное волновое сопротивление 75 Ом. Расчет проводить на верхней частоте системы передачи ИКМ-1920.

4 Изоляция коаксиальной пары выполнена в виде полиэтиленовой спирали и имеет относительную диэлектрическую проницаемость 1,1. Найти внутренний диаметр внешнего медного проводника при условии, что диаметр внутреннего медного проводника равен 2,6 мм, если кабель имеет нормированное волновое сопротивление 75 Ом.

5 Определить, каким должно быть расстояние между полиэтиленовыми шайбами толщиной 2,2 мм в коаксиальной паре 2,6/9,4 мм с волновым нормированным сопротивлением в 50 Ом.

6 Определить, насколько должно измениться расстояние между полиэтиленовыми шайбами толщиной 2,3 мм в коаксиальной паре с внутренним медным проводником кабеля, рассчитанного на минимальное затухание, если внешний медный проводник заменить на алюминиевый. Волновое сопротивление кабеля нормировано величиной 75 Ом.

ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ

1 Нагрузка на растяжение

1.1 Решение типовых задач

1. Насколько изменилась допустимая нагрузка на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-5-8, если при его изготовлении заменили материал центрального упрочняющего материала с нитей СВМ на кевлар? Рассчитать допустимое растяжение кабеля в обоих случаях.

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,7 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,5 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,5 мм;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,5 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,01$.

Кабель содержит 8 оптических модулей. Так как кабель второй разработки, диаметр его оптического модуля составляет 2,5 мм.

Элементы конструкции, к которым прикладывается нагрузка:

- силового элемента;
- оболочки силового элемента;
- трубки оптического модуля;
- внешней оболочки кабеля.

Силовой элемент без оболочки:

- диаметр: $d_{сз} = 3,7 - 2 \cdot 0,5 = 2,7 \text{ мм}$;
- площадь: $S_{сз} = \pi r^2 = 3,14 \cdot (0,5 \cdot 2,7)^2 = 3,14 \cdot 1,35^2 = 5,72 \text{ мм}^2 = 5,72 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$;
- допустимое растяжение элемента из нитей СВМ:
 $F_{свм} = 0,01 \cdot 1 \cdot 6500 \cdot 10^7 \cdot 5,72 \cdot 10^{-6} = 3718 \text{ Н}$;
- допустимое растяжение элемента из кевлара:

Направляющие среды электросвязи

$$F_{\text{кевлар}} = 0,01 \cdot 1 \cdot 12500 \cdot 10^7 \cdot 5,72 \cdot 10^{-6} = 7150 \text{ Н}.$$

Оболочка силового элемента:

$$\begin{aligned} \text{- площадь: } S_{\text{осэ}} &= (\pi r_{\text{внеш}}^2 - \pi r_{\text{внутр}}^2) = 0,25 \cdot \pi \cdot (d_{\text{внеш}}^2 - d_{\text{внутр}}^2) = 0,25 \cdot 3,14 \times \\ &\times (3,7^2 - 2,7^2) = 5,02 \text{ мм}^2 = 5,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \end{aligned}$$

- допустимое растяжение поливинилхлоридной оболочки:

$$F_{\text{пех}} = 0,01 \cdot 1 \cdot 300 \cdot 10^7 \cdot 5,02 \cdot 10^{-6} = 150,6 \text{ Н};$$

Оболочка одного оптического модуля:

$$\text{- диаметр модуля без оболочки: } d_{\text{м}} = 2,5 - 2 \cdot 0,5 = 1,5 \text{ мм}$$

$$\begin{aligned} \text{- площадь: } S_{\text{ом}} &= 0,25 \cdot \pi \cdot (d_{\text{внеш}}^2 - d_{\text{внутр}}^2) = 0,25 \cdot 3,14 \cdot (2,5^2 - 1,5^2) = \\ &= 3,14 \text{ мм}^2 = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \end{aligned}$$

- допустимое растяжение фторопластовой оболочки одного модуля:

$$F_{\text{фп}} = 0,01 \cdot \cos 35^\circ \cdot 225 \cdot 10^7 \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} = 56,5 \text{ Н}.$$

Оболочка кабеля:

$$\text{- диаметр кабеля без оболочки: } d_{\text{к}} = 13 - 2 \cdot 1,5 = 10 \text{ мм};$$

$$\begin{aligned} \text{- площадь: } S_{\text{ок}} &= 0,25 \cdot \pi \cdot (d_{\text{внеш}}^2 - d_{\text{внутр}}^2) = 0,25 \cdot 3,14 \cdot (13^2 - 10^2) = \\ &= 54,16 \text{ мм}^2 = 54,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \end{aligned}$$

- допустимое растяжение полиэтиленовой оболочки:

$$F_{\text{пэ}} = 0,01 \cdot 1 \cdot 15 \cdot 10^7 \cdot 54,16 \cdot 10^{-6} = 81,2 \text{ Н}.$$

Разница в допустимом растяжении кабеля при смене материала силового элемента будет определяться соотношением:

$$F_{\text{кевлар}} - F_{\text{свм}} = 7150 - 3718 = 3432 \text{ Н}.$$

Допустимое растяжение кабеля с силовым элементом из нитей СВМ: $F = 3718 + 150,6 + 8 \cdot 56,5 + 81,2 = 4401,8 \text{ Н}$

Допустимое растяжение кабеля с кевларовым силовым элементом: $F = 7150 + 150,6 + 8 \cdot 56,5 + 81,2 = 7833,8 \text{ Н}$

2 Насколько изменится радиус сердцевины центрального упрочняющего элемента, изготовленной из нитей СВМ, кабеля ОК-50-2-3-8, если требуется получить конструкцию с минимально допустимым для линейных кабелей растягивающим усилием.

При расчете использовать конструктивные размеры из задачи 1.

Геометрические размеры кабелей ОК-50-2-3-8 и ОК-50-2-5-8 одинаковы, воспользуемся результатами предыдущей задачи.

Минимально допустимое растягивающее усилие для линейных кабелей типа ОК-50 1200 Н

Значение площади сечения сердцевины конструкции с минимально допустимым для линейных кабелей растягивающим усилием:

$$S_{арм} = \frac{1}{E_{арм}} \left(\frac{F}{\delta} - \sum_{i=1}^{n-1} k_i E_i S_i \right) = \frac{1}{6500 \cdot 10^7} \left(\frac{1200}{0,01} - \frac{150,6 + 8 \cdot 56,5 + 81,2}{0,01} \right) =$$

$$= \frac{1}{65000} (120000 - 68380) \cdot 10^{-6} = 0,79 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 0,79 \text{ мм}^2.$$

Новый радиус сердцевины:

$$r = \sqrt{\frac{S_{арм}}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,79}{3,14}} = 0,50 \text{ мм}$$

Старый радиус сердцевины (по задаче 1):

$$r = \frac{d}{2} = \frac{2,7}{2} = 1,35 \text{ мм}$$

Разница радиусов сердцевины: $\Delta r = 0,5 - 1,35 = -0,85 \text{ мм}$.

Т.о. радиус сердцевины уменьшится на 0,85 мм.

1.2 Задачи для самостоятельного решения

1 Насколько изменилась допустимая нагрузка на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-3-8, если при его изготовлении внешний диаметр оболочки изменялся в пределах нормы? Рассчитать допустимое растяжение кабеля в обоих случаях.

При расчете использовать следующие значения:

- *внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,7 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,4 мм;*
- *толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,55 мм;*
- *толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,6 мм;*
- *наружный диаметр кабеля 13 мм;*
- *коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,01$.*

2 Какой объем гидрофобного заполнителя потребуется для заполнения свободного внутреннего пространства 1 км кабеля ОК-50-2-5-8?

Направляющие среды электросвязи

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,7 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,5 мм;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,5 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм.

3 Насколько изменилась допустимая нагрузка на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-3-8, если при изготовлении кабеля заменили материал центрального упрочняющего элемента с нитей СВМ на сталь? Рассчитать допустимое растяжение кабеля в обоих случаях.

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,6 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,55 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,45 мм;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,8 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,02$.

4 Сравнить допустимую нагрузку на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-3-8 и ОК-50-2-3-4.

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,7 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,5 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,5 мм;
- толщина поливинилхлоридной трубки корделя заполнения 0,5 мм;
- кордели заполнения выполнены из стеклопластика;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,7 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,02$.

5 Проверить, будет ли выдерживать кабель ОКСНМ-10-01-0,22-24 (6,0) требуемую нагрузку на растяжение, при толщине слоя арамидных нитей 0,2 мм? А при толщине 0,25 мм?

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,5 мм;
- наружный диаметр оптического модуля 3,0 мм;
- толщина трубки оптического модуля из полибутилен-терефталата 0,5 мм;
- толщина внутренней полиэтиленовой оболочки 0,4 мм;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 2 мм;
- наружный диаметр кабеля 14 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,01$.

6 Рассчитать минимальную толщину слоя арамидных нитей для кабеля ОКСНМ-10-01-0,22-24 (6,0) со следующими параметрами:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,5 мм;
- наружный диаметр оптического модуля 2,4 мм;
- толщина трубки оптического модуля из полибутилен-терефталата 0,4 мм;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 2 мм;
- наружный диаметр кабеля 14,8 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,01$.

При расчетах пренебречь вкладом внутренней полиэтиленовой оболочки.

7 Рассчитать и сравнить допустимую нагрузку на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-3-4 и ОК-50-3-3-4.

При расчете использовать следующие значения:

- внешний диаметр центрального упрочняющего элемента 3,5 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки 0,55 мм;
- толщина фторопластовой трубки оптического модуля 0,45 мм;

- толщина поливинилхлоридной трубки корделя заполнения 0,5 мм;
- кордели заполнения выполнены из стеклопластика;
- толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,5 мм;
- наружный диаметр кабеля 13 мм;
- коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,02$.

2 Основные параметры

2.1 Решение типовых задач

1 Определить число мод, распространяющихся в оптическом волокне кабеля типа ОКК-50-01-4 при $n_2=1,490$, $\Delta=0,01$. Насколько изменится число мод при изменении диаметра сердцевинны оптоволокна в пределах нормы?

В кабеле используется градиентное оптоволокно с диаметром сердцевинны 50 ± 3 мкм. Кабель используется на длине волны 1,3 мкм.

Для нахождения числа мод, распространяющихся в оптоволокне, необходимо знать показатель преломления середины волокна n_1 . Из формулы для нахождения относительного значения показателя преломления имеем:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \Rightarrow 2\Delta n_1^2 = n_1^2 - n_2^2 \Rightarrow n_1^2(1 - 2\Delta) = n_2^2 \Rightarrow n_1 = \sqrt{\frac{n_2^2}{1 - 2\Delta}}.$$

$$n_1 = \sqrt{\frac{1,49^2}{1 - 2 \cdot 0,01}} = 1,505.$$

Число мод при диаметре сердцевинны 50 мкм:

$$N = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2}{1,3} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2} \right)^2 = 165.$$

Если диаметр сердцевинны изменяется в пределах нормы, то минимальный диаметр равен 47 мкм, максимальный 53 мкм. Тогда число мод:

$$N_{47} = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 47 / 2}{1,3} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2} \right)^2 = 145.$$

Направляющие среды электросвязи

$$N_{53} = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 53/2}{1,3} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2} \right)^2 = 185.$$

Т.о. при изменении диаметра сердцевины оптического волокна в пределах нормы число распространяющихся мод меняется на 40.

2 Определить, во сколько раз отличается величина нормированной частоты в оптическом волокне кабеля типа ОКК-50-01 от нормированной частоты в оптическом волокне кабеля типа ОКК-10-01 при $n_1=1,510$, $\Delta=0,01$.

Для нахождения нормированной частоты необходимо знать еще показатель преломления оболочки оптического волокна. Найдем ее из формулы для нахождения относительного значения показателя преломления:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \Rightarrow n_1^2(1 - 2\Delta) = n_2^2 \Rightarrow n_2 = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta}.$$

Показатель преломления оболочки оптического волокна:

$$n_2 = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = 1,51 \sqrt{1 - 2 \cdot 0,01} = 1,495.$$

Нормированная частота в кабеле типа ОК-50-01:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50/2}{1,3} \sqrt{1,51^2 - 1,495^2} = 25,64.$$

Нормированная частота в кабеле типа ОКК-10-01:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10/2}{1,3} \sqrt{1,51^2 - 1,495^2} = 5,13.$$

Соотношение частот:

$$\frac{25,64}{5,13} \approx 5.$$

3 Определить, насколько отличается величина числовой апертуры в оптоволокне кабеля типа ОКК-50-01 от числовой апертуры в оптоволокне кабеля типа ОМЗКГ-10-1. В обоих типах оптических волокон $\Delta=0,01$; для ОВ в кабеле ОКК-50-01 $n_1=1,505$, для ОВ в кабеле ОМЗКГ-10-1 $n_1=1,510$.

Для определения числовой апертуры необходимо знать еще показатель преломления оболочки оптического волокна.

ОКК-50-01:

$$n_2 = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = 1,505 \sqrt{1 - 2 \cdot 0,01} = 1,49$$

ОМЗКГ-10-1:

$$n_2 = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = 1,51 \sqrt{1 - 2 \cdot 0,01} = 1,495$$

Тогда числовая апертура

ОКК-50-01:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,505^2 - 1,49^2} = 0,212 .$$

ОМЗКГ-10-1:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,51^2 - 1,495^2} = 0,2123 .$$

Разница числовых апертур составляет 0,0003.

4 Насколько изменится критическая частота в оптических волокнах кабеля типа ОКЛ-01 при изменении параметров сердцевин в пределах нормы? Рассчитать значение критической частоты для стандартного диаметра сердцевин оптического волокна. Значения параметров ОВ: $n_2=1,490$, $\Delta=0,01$. Тип волны HE.

Для нахождения критической частоты необходимо найти значение n_1 :

$$n_1 = \sqrt{\frac{n_2^2}{1 - 2\Delta}} = \sqrt{\frac{1,49^2}{1 - 2 \cdot 0,01}} = 1,505 .$$

Оптическое волокно одномодовое. Первая мода волны HE является основной и существует всегда. Вторая мода образуется при значении $P_{nm} = 3,832$.

Если диаметр сердцевин оптоволокна принять равным 8,5 мкм:

$$f_0 = \frac{P_{nm} c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,832 \cdot 3000000000}{3,14 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2}} = 2,03 \cdot 10^{14} \text{ Гц} .$$

Если диаметр сердцевин оптоволокна 7,5 мкм:

$$f_0 = \frac{P_{nm} c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,832 \cdot 3000000000}{3,14 \cdot 7,5 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2}} = 2,30 \cdot 10^{14} \text{ Гц} .$$

Если диаметр сердцевин оптоволокна 9,5 мкм:

$$f_0 = \frac{P_{nm} c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,832 \cdot 3000000000}{3,14 \cdot 9,5 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,505^2 - 1,49^2}} = 1,82 \cdot 10^{14} \text{ Гц} .$$

При изменении диаметра сердцевин в пределах нормы критическая частота уменьшится 48 ТГц.

5 Насколько изменится критическая длина волны в оптических волокнах кабеля типа ОКЛ-01, если изменится передаваемый тип волны и вместо E_{01} передается HE_{21} ? Значения параметров ОВ: $n_1=1,504$, $\Delta=0,01$.

Для нахождения критической длины волны знать еще показатель преломления оболочки оптического волокна.

$$n_2 = n_1 \sqrt{(1 - 2\Delta)} = 1,504 \sqrt{(1 - 2 \cdot 0,01)} = 1,489.$$

Для волны E_{01}

$$\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{nm} n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{3,14 \cdot 8,5}{2,405 \cdot 1,504} \sqrt{1,504^2 - 1,489^2} = 1,56 \text{ мкм}.$$

Для волны HE_{21}

$$\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{nm} n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{3,14 \cdot 8,5}{2,443 \cdot 1,504} \sqrt{1,504^2 - 1,489^2} = 1,54 \text{ мкм}.$$

Критическая длина волны уменьшится на 0,02 мкм.

2.2 Задачи для самостоятельного решения

1 Определить число мод, распространяющихся в оптическом волокне кабеля типа ОК-50-2-5-4 при $n_2=1,5$, $\Delta=0,012$. Насколько изменится число мод при изменении диаметра сердцевины оптоволокну в пределах нормы?

2 Определить, во сколько раз отличается величина нормированной частоты в оптическом волокне кабеля типа ОКК-50-01 от нормированной частоты в оптическом волокне кабеля типа ОКЛБ-01-0,3 при $n_1=1,51$, $\Delta=0,011$.

3 Определить, насколько отличается величина числовой апертуры в оптоволокну кабеля типа ОКК-50-01 от числовой апертуры в оптоволокну кабеля типа ОКЛБ-01-0,3. В обоих типах оптических волокон $\Delta=0,011$; для ОВ в кабеле ОКК-50-01 $n_1=1,503$, для ОВ в кабеле ОКЛБ-01-0,3 $n_1=1,508$.

4 Насколько изменится критическая частота в оптических волокнах кабеля типа ОКЛС-01 при изменении параметров сердцевины в пределах нормы? Рассчитать значение критической частоты для стандартного диаметра сердцевины оптического волокна. Значения параметров ОВ: $n_2=1,480$, $\Delta=0,01$. Тип волны HE_{21} .

5 Насколько изменятся критическая частота и критическая длина волны в оптических волокнах кабеля типа ОКЛ-01, если изменится передаваемый тип волны и вместо E_{01} передается EH_{11} ? Значения параметров ОВ: $n_1=1,5$, $\Delta=0,011$.

3 Затухание

3.1 Решение типовых задач

1 Насколько изменятся собственные потери в оптическом волокне, если передача сигналов будет осуществляться не в третьем, а в первом окне прозрачности. Параметры оптического волокна $n_2=1,490$, $\Delta=0,01$, $\text{tg}\delta=10^{-11}$.

Коэффициент преломления сердечника оптического волокна

$$n_1 = \sqrt{\frac{1,49^2}{1 - 2 \cdot 0,01}} = 1,505.$$

Третье окно прозрачности соответствует длине волны 1550 нм (или 1,55 мкм), первое – 850 нм (0,85 мкм).

Собственные потери в оптическом волокне складываются из потерь на поглощение (материалом и на примеси) и потерь на рассеяние.

Третье окно прозрачности:

- общие потери на поглощение:

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \text{tg} \delta}{\lambda} = 8,69 \frac{3,14 \cdot 1,505 \cdot 10^{-11}}{1,55 \cdot 10^{-6}} = 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км};$$

- потери на рассеяние:

$$\alpha_p = \frac{K}{(\lambda_{\text{мкм}})^4} = \frac{0,8}{1,55^4} = 0,14 \text{ дБ/км};$$

- собственные потери:

$$\alpha_c = 0,26 \cdot 10^{-3} + 0,14 = 0,14 \text{ дБ/км}.$$

Первое окно прозрачности:

- общие потери на поглощение:

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 \text{tg} \delta}{\lambda} = 8,69 \frac{3,14 \cdot 1,505 \cdot 10^{-11}}{0,85 \cdot 10^{-3}} = 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км};$$

- потери на рассеяние:

$$\alpha_p = \frac{K}{(\lambda_{\text{мкм}})^4} = \frac{0,8}{0,85^4} = 1,53 \text{ дБ/км};$$

- собственные потери:

$$\alpha_c = 0,48 \cdot 10^{-3} + 1,53 = 1,53 \text{ дБ/км}.$$

Т.о. при переносе передачи с третьего в первое окно прозрачности собственные потери увеличатся на 1,39 дБ/км.

2 Какое дополнительное затухание следует ожидать в кварцевом оптическом оптоволокне, если по нему хотят передать сигналы с длинами волн 2, 2,5 и 3 мкм?

Дополнительные потери на 2 мкм:

$$\alpha = Ce^{-k/\lambda} = 0,9 \exp\left(-\frac{0,8 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}}\right) = 0,603 \text{ дБ/км}.$$

Дополнительные потери на 2,5 мкм:

$$\alpha = Ce^{-k/\lambda} = 0,9 \exp\left(-\frac{0,8 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-6}}\right) = 0,645 \text{ дБ/км}.$$

Дополнительные потери на 3 мкм:

$$\alpha = Ce^{-k/\lambda} = 0,9 \exp\left(-\frac{0,8 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}}\right) = 0,689 \text{ дБ/км}.$$

3 Какое дополнительное затухание следует ожидать в кварцевом оптическом волокне, если при изготовлении кабеля ОКК-50-01-4 возникли дополнительные микроизгибы. Параметры оптического волокна и микроизгибов: $\Delta=0,0053$, $N_n=100$, $y_n=0,0025$ мм, $E_o=6,9 \cdot 10^8$ Н/м², $E_c=6,2 \cdot 10^{10}$ Н/м².

Оптическое волокно кабеля ОКК-50-01-4 имеет диаметр отражающей оболочки 125 мкм, диаметр сердцевины 50 мкм.

$$\alpha_{\text{микро}} = k_3 N_n y_n^2 \frac{a^4}{\Delta^3 b^6} \left(\frac{E_o}{E_c}\right)^{3/2} = 0,9 \cdot 100 \cdot 2,5^2 \cdot \frac{(50/2)^4}{0,0053^3 \cdot 125^6} \times$$

$$\times \left(\frac{6,9 \cdot 10^8}{6,2 \cdot 10^{10}}\right)^{3/2} = 0,45 \text{ дБ/км}.$$

4 При сращивании строительных длин оптического кабеля ОКК-10-01 в одном из волокон произошло радиальное смещение

торцов на 1 мкм. Определить возникшие при этом дополнительные потери.

Диаметр сердцевины оптоволокна кабеля ОКК-10-01 составляет 10 мкм.

Тогда дополнительные потери составят:

$$A_{\delta} = 10 \lg \frac{d}{d - \delta} = 10 \lg \frac{10}{9} = 0,46 \text{ дБ}.$$

5 При соединении световодного соединительного шнура в кроссовом оптическом шкафу с линейным оптическим кабелем ОКК-50-01 произошло угловое смещение торцов волокна на 3°. Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры ОВ: $n_1 = 1,505$, $\Delta = 0,01$.

Для нахождения дополнительных потерь в этом случае необходимо знать значение апертурного угла.

Рассчитаем показатель преломления оболочки оптического волокна

$$n_2 = n_1 \sqrt{(1 - 2\Delta)} = 1,505 \sqrt{(1 - 2 \cdot 0,01)} = 1,49.$$

Числовая апертура:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,505^2 - 1,49^2} = 0,212, \text{ откуда апертурный угол}$$

$$\theta = \arcsin(NA) = \arcsin(0,212) = 0,214 \text{ рад} = 12,3^\circ.$$

Дополнительные потери

$$A_{\theta} = 10 \lg \frac{\theta_A}{\theta_A - \theta} = 10 \lg \frac{12,3}{12,3 - 3} = 1,21 \text{ дБ}.$$

6 С течением времени в разъёмном соединителе станционного оптического кабеля ОКК-50-01 произошло осевое смещение торцов оптического волокна на 25 мкм. Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры оптического волокна $n_2 = 1,49$, $\Delta = 0,01$.

Диаметр сердцевины оптоволокна данного кабеля составляет 50 мкм.

Необходимо найти значение апертурного угла.

$$n_1 = \sqrt{\frac{1,49^2}{1 - 2 \cdot 0,01}} = 1,505$$

Параметры совпадают с предыдущей задачей, следовательно, апертурный угол равен $12,3^\circ$.

Дополнительные потери

$$A_0 = 10 \lg \frac{2d}{2d - S \operatorname{tg} \theta_A} = 10 \lg \frac{2 \cdot 50}{2 \cdot 50 - 25 \cdot \operatorname{tg}(12,3^\circ)} = 0,24, \text{ дБ}.$$

3.2 Задачи для самостоятельного решения

1 Насколько изменятся собственные потери в оптическом волокне, если передача сигналов будет осуществляться не в третьем, а во втором окне прозрачности. Параметры оптического волокна $n_2=1,495$, $\Delta=0,011$, $\operatorname{tg} \delta=10^{-11}$.

2 Какое дополнительное затухание следует ожидать в оптических волокнах кабеля типа ОКЛС-01, если по нему хотят передать сигналы с длинами волн 1,8, 2,3 и 2,9 мкм?

3 Какое дополнительное затухание следует ожидать в кварцевом оптическом волокне, если при изготовлении кабеля ОК-50-2-3-8 возникли дополнительные микроизгибы. Параметры оптического волокна и микроизгибов: $\Delta=0,005$, $N_n=200$, $y_n=0,0025$ мм, $E_o=6,9 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$, $E_c=6,2 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$.

4 При сращивании строительных длин оптического кабеля ОК-50-2-3-8 в одном из волокон произошло радиальное смещение торцов на 5 мкм. Определить возникшие при этом дополнительные потери.

5 При соединении световодного соединительного шнура в кроссовом оптическом шкафу с линейным оптическим кабелем ОК-50-3-3-8 произошло угловое смещение торцов волокна на 8° . Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры ОВ: $n_1=1,5$, $\Delta=0,009$.

6 С течением времени в разъемном соединителе станционного оптического кабеля ОКС-50-01 произошло осевое смещение торцов оптического волокна на 15 мкм и угловое смещение торцов волокна на 5° . Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры оптического волокна $n_2=1,49$, $\Delta=0,009$.

4 Дисперсия

4.1 Решение типовых задач

1 На межстанционной ВОЛС проложены два типа кабелей – с градиентными и ступенчатыми многомодовыми оптическими волокнами. Определить, во сколько раз отличается уширение импульсов в этих кабелях. Длина ВОЛС равна 9 км; $n_2=1,490$, $\Delta n=0,015$.

Коэффициент преломления сердечника оптического волокна

$$n_1 = n_2 + \Delta n = 1,490 + 0,015 = 1,505 .$$

Относительное значение показателя преломления:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{1,505^2 - 1,49^2}{2 \cdot 1,505^2} = 0,01 .$$

В оптических кабелях с многомодовыми волокнами наибольший вклад в уширение импульсов вносит модовая дисперсия.

Межмодовая дисперсия:

- ступенчатый профиль: $L_c=5-7$ км $\Rightarrow L > L_c$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{n_1 \Delta}{c} \sqrt{LL_c} = \frac{1,505 \cdot 0,01}{300000} \sqrt{9 \cdot 5} = 0,337 \text{ мкс} .$$

- градиентный профиль: $L_c=10-15$ км $\Rightarrow L < L_c$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L = \frac{1,505 \cdot 0,01^2}{2 \cdot 300000} \cdot 9 = 2,258 \text{ нс} .$$

Отношение дисперсий:

$$\frac{0,337 \cdot 10^{-6}}{2,258 \cdot 10^{-9}} = 149,1 .$$

Уширение импульсов в кабеле со ступенчатыми многомодовыми оптическими волокнами будет в 149,1 раз больше, чем в кабеле с градиентными волокнами.

2 Во сколько раз изменится величина дисперсии сигнала в ВОЛС, построенной на основе кабеля ОКЛ-01, если заменить источник излучения с лазерного на светодиодный с длиной волны 0,85 мкм. Длина ВОЛС 63 км.

ОКЛ-01 – кабель с одномодовыми волокнами. Для опреде-

Направляющие среды электросвязи

ления дисперсии необходимо рассчитать хроматическую дисперсию (материальная, волноводная, профильная). Кабель предназначен для работы на длине волны 1,55 мкм.

Материальная дисперсия:

- лазерный ИИ:

$$\tau_{mat} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda) = 1 \cdot 63 \cdot (-18) = -1134 \text{ пс} = -1,134 \text{ нс} ;$$

- светодиодный ИИ:

$$\tau_{mat} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda) = 20 \cdot 63 \cdot 125 = 157500 \text{ пс} = 157,5 \text{ нс} .$$

Волноводная дисперсия

- лазерный ИИ:

$$\tau_{вв} = \Delta\lambda \cdot L \cdot B(\lambda) = 1 \cdot 63 \cdot 12 = 756 \text{ пс} = 0,756 \text{ нс} ;$$

- светодиодный ИИ:

$$\tau_{вв} = \Delta\lambda \cdot L \cdot B(\lambda) = 20 \cdot 63 \cdot 5 = 6300 \text{ пс} = 6,3 \text{ нс} .$$

Профильная дисперсия

- лазерный ИИ:

$$\tau_{пр} = \Delta\lambda \cdot L \cdot P(\lambda) = 1 \cdot 63 \cdot 5 = 315 \text{ пс} = 0,315 \text{ нс} ;$$

- светодиодный ИИ:

$$\tau_{пр} = \Delta\lambda \cdot L \cdot P(\lambda) = 20 \cdot 63 \cdot 0 = 0 \text{ нс} .$$

Хроматическая дисперсия:

- лазерный ИИ:

$$\tau_{хр} = \tau_{mat} + \tau_{вв} + \tau_{пр} = -1,134 + 0,756 + 0,315 = -0,063 \text{ нс} ;$$

- светодиодный ИИ:

$$\tau_{хр} = \tau_{mat} + \tau_{вв} + \tau_{пр} = 157,5 + 6,3 + 0 = 163,8 \text{ нс} .$$

Отношение дисперсий:

$$\frac{163,8}{-0,063} = -2600 .$$

Дисперсия при использовании светодиодного источника излучения будет в 2600 раз больше.

4.2 Задачи для самостоятельного решения

1 На межстанционной ВОЛС проложены два типа кабелей – с градиентными и ступенчатыми многомодовыми оптическими волноками. Определить, во сколько раз отличается уширение импульсов в этих кабелях. Длина ВОЛС равна 11 км; $n_2=1,492$, $\Delta n=0,01$.

Направляющие среды электросвязи

2 Во сколько раз изменится величина дисперсии сигнала в ВОЛС, построенной на основе кабеля ОМЗКГ, если заменить источник излучения с лазерного на светодиодный с длиной волны 0,87 мкм. Длина ВОЛС 48 км.

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.

4. Воронков А.А., Бурдин В.А., Попов Б.В. Проектирование кабельных линий связи. Методическая разработка по курсовому и дипломному проектированию для студентов специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы» (201000) дневной и заочной формы обучения. Самара: Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики, 2005. 63 с.

5. Правила строительства и ремонта воздушных линий связи и радиотрансляционных сетей. Часть 1. М.: Связь, 1975 . 241 с.

6. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: справочник / И.И. Гроднев [и др.]. М.: Радио и связь, 1993. 264 с.

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Общие таблицы

Таблица 1 – Эффективный диаметр групп при бумажной изоляции

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

Таблица 2 – Свойства металлов

	Медь	Алюминий	Сталь	Свинец
Удельное сопротивление при $t=20^\circ\text{C}$, Ом·мм ² /м	0,0175	0,0295	0,138	0,221
Плотность, г/см ³	8,9	2,7	7,8	11,4

Таблица 3 – Дополнительные сведения о металлах

Материал	$k = \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$, мм ⁻¹	kr	σ , м/(Ом·мм ²)
Медь	$0,021 \sqrt{f[\Gamma y]}$	$0,0105 d \sqrt{f[\Gamma y]}$	57,00
Алюминий	$0,0164 \sqrt{f[\Gamma y]}$	$0,082 d \sqrt{f[\Gamma y]}$	34,36
Сталь	$0,075 \sqrt{f[\Gamma y]}$	$0,0375 d \sqrt{f[\Gamma y]}$	7,23

Таблица 4 – Значения коэффициентов F , G , H , Q в зависимости от значения kr

kr	$F(kr)$	$G(kr)$	$H(kr)$	$Q(kr)$
0	0	0	0,0417	1
0,1	0	0	0,0417	1
0,2	0	0	0,0417	1
0,3	0	0	0,0417	1
0,4	0	0	0,0417	1
0,5	0	0,001	0,042	1
0,6	0,001	0,002	0,044	1
0,7	0,001	0,004	0,045	0,999
0,8	0,002	0,006	0,046	0,999
0,9	0,003	0,01	0,049	0,998
1	0,005	0,015	0,053	0,997
1,1	0,008	0,022	0,058	0,996
1,2	0,011	0,031	0,064	0,995
1,3	0,015	0,041	0,072	0,993

Направляющие среды электросвязи

1,4	0,02	0,054	0,08	0,99
1,5	0,026	0,069	0,092	0,987
1,6	0,033	0,086	0,106	0,983
1,7	0,042	0,106	0,122	0,979
1,8	0,052	0,127	0,137	0,974
1,9	0,064	0,149	0,154	0,968
2	0,078	0,172	0,169	0,961
2,1	0,094	0,196	0,187	0,953
2,2	0,111	0,221	0,206	0,945
2,3	0,131	0,246	0,224	0,935
2,4	0,152	0,271	0,242	0,925
2,5	0,175	0,295	0,263	0,913
2,6	0,201	0,318	0,28	0,901
2,7	0,228	0,341	0,298	0,888
2,8	0,256	0,363	0,316	0,874
2,9	0,286	0,384	0,333	0,86
3	0,318	0,405	0,348	0,845
3,1	0,351	0,425	0,362	0,83
3,2	0,385	0,444	0,376	0,814
3,3	0,42	0,463	0,388	0,798
3,4	0,456	0,481	0,4	0,782
3,5	0,492	0,499	0,41	0,766
3,6	0,529	0,516	0,42	0,749
3,7	0,566	0,533	0,43	0,733
3,8	0,603	0,55	0,44	0,717
3,9	0,64	0,567	0,45	0,702
4	0,678	0,584	0,46	0,688
4,1	0,715	0,601	0,466	0,671
4,2	0,752	0,618	0,474	0,657
4,3	0,789	0,635	0,484	0,643
4,4	0,862	0,652	0,49	0,629
4,5	0,863	0,669	0,497	0,616
4,6	0,899	0,686	0,505	0,603
4,7	0,935	0,703	0,51	0,59
4,8	0,971	0,72	0,516	0,579
4,9	1,007	0,738	0,524	0,567
5	1,043	0,755	0,53	0,556
5,1	1,078	0,772	0,535	0,545
5,2	1,114	0,79	0,54	0,535

Направляющие среды электросвязи

5,3	1,149	0,808	0,545	0,525
5,4	1,184	0,826	0,55	0,516
5,5	1,219	0,843	0,554	0,507
5,6	1,254	0,861	0,558	0,498
5,7	1,289	0,879	0,562	0,489
5,8	1,324	0,896	0,566	0,481
5,9	1,359	0,914	0,571	0,473
6	1,394	0,932	0,575	0,465
6,1	1,429	0,959	0,579	0,458
6,2	1,463	0,967	0,582	0,451
6,3	1,498	0,985	0,586	0,443
6,4	1,533	1,003	0,59	0,436
6,5	1,568	1,02	0,593	0,43
6,6	1,603	1,038	0,596	0,424
6,7	1,638	1,055	0,599	0,418
6,8	1,673	1,073	0,602	0,412
6,9	1,708	1,091	0,605	0,406
7	1,743	1,109	0,608	0,4
7,1	1,778	1,126	0,611	0,394
7,2	1,813	1,144	0,614	0,389
7,3	1,848	1,162	0,617	0,384
7,4	1,884	1,18	0,62	0,379
7,5	1,919	1,198	0,622	0,374
7,6	1,954	1,216	0,624	0,369
7,7	1,989	1,233	0,627	0,364
7,8	2,024	1,251	0,63	0,36
7,9	2,059	1,269	0,632	0,355
8	2,094	1,287	0,634	0,351
8,1	2,129	1,304	0,637	0,347
8,2	2,165	1,322	0,64	0,343
8,3	2,2	1,339	0,642	0,339
8,4	2,235	1,357	0,644	0,335
8,5	2,27	1,375	0,646	0,331
8,6	2,306	1,393	0,647	0,327
8,7	2,341	1,41	0,649	0,323
8,8	2,376	1,428	0,651	0,32
8,9	2,411	1,446	0,653	0,316
9	2,446	1,464	0,655	0,313
9,1	2,481	1,481	0,657	0,309

Направляющие среды электросвязи

9,2	2,517	1,499	0,658	0,306
9,3	2,552	1,516	0,66	0,302
9,4	2,587	1,534	0,662	0,299
9,5	2,622	1,552	0,664	0,296
9,6	2,658	1,57	0,666	0,293
9,7	2,693	1,587	0,667	0,29
9,8	2,728	1,605	0,668	0,287
9,9	2,763	1,623	0,669	0,284
10	2,799	1,641	0,67	0,282
>10	$\frac{\sqrt{2} kr - 3}{4}$	$\frac{\sqrt{2} kr - 1}{8}$	$\frac{1}{4} \left[\frac{3\sqrt{2} kr - 5}{\sqrt{2} kr - 1} - \frac{2\sqrt{2}}{kr} \right]$	$\frac{2\sqrt{2}}{kr}$

Симметричные кабели связи

Таблица 1 – Эффективный диаметр пар с воздушно-бумажной изоляцией

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

Таблица 2 - Сопротивление дополнительных потерь $R_{м200,}$ Ом/км

Число четверок в кабеле	Потери в повивах четверок для оболочки для повивов			Потри от свинцовой оболочки для повивов			Потери от алюминиевой оболочки для повивов		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0			22			8,1		
4	7,5			14			5,2		
1+6	8	7,5		1,5	5,5		0,6	2	
1+6+12	8	7,5	7,5	0	0	1	0	0	0,4

Таблица 3 – Значения температурного коэффициента сопротивления (расчет R)

Материал проводников	Температурный коэффициент сопротивления α_R
Медь	0,0039
Сталь	0,0046
Биметалл	0,0041
Алюминий	0,0037

Таблица 4 – Характеристики изоляции сложной структуры

Тип изоляции	ϵ_s	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-4}$ при частоте, кГц
--------------	--------------	---

Направляющие среды электросвязи

		10	100	250	550
Кордельно-бумажная	1,3-1,4	55	113	160	280
Кордельно-стирофлексная	1,2-1,3	3	7	12	20
Полиэтиленовая (сплошная)	1,9-2,1	2	6	8	14
Пористо-полиэтиленовая	1,4-1,5	3	8	12	20
Баллонно-полиэтиленовая	1,2-1,3	2	6	8	12

Таблица 5 – Значения поправочного температурного коэффициента (расчет G)

Вид изоляции	T при температуре, $^{\circ}\text{C}$							
	5	10	15	20	25	30	35	40
Бумажная	2,46	1,82	1,35	1,00	0,74	0,55	0,41	0,30
Стирофлексная	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98

Таблица 6 – Конструкция симметричных кабелей связи

Тип кабеля	Конструктивные особенности
МКГ	Магистральный; изоляция кордельно-трубчатая, бумажная: диаметр бумажного корделя 0,81 мм, 2 ленты кабельной бумаги К-17 толщиной 0,17 мм; коэффициент укрутки 1,02; оболочка кабеля свинцовая
МКПА	Магистральный, изоляция кордельно-трубчатая, полиэтиленовая: полиэтиленовый кордель диаметром 0,65 мм, трубка из сплошного полиэтилена толщиной стенки 0,23 мм; коэффициент укрутки 1,02; оболочка кабеля алюминиевая
МКПГ	Магистральный, изоляция кордельно-трубчатая, полиэтиленовая: полиэтиленовый кордель диаметром 0,65 мм, трубка из сплошного полиэтилена толщиной стенки 0,23 мм; коэффициент укрутки 1,02; оболочка кабеля свинцовая
МКПВ	Магистральный, изоляция сплошная полиэтиленовая: толщина изоляции 1,1 мм; коэффициент укрутки 1,02; оболочка кабеля из поливинилхлоридного пластика.
МКПП	Магистральный, изоляция сплошная пористо-полиэтиленовая: толщина изоляции 1,05 мм; коэффициент укрутки 1,02; оболочка кабеля из поливинилхлоридного пластика.
МКС	Магистральный, кордельно-трубчатая стирофлексная: диаметр корделя 0,8 мм, толщина стирофлексной ленты 0,05 мм; коэффициент укрутки 1,02; оболочка кабеля свинцовая

Направляющие среды электросвязи

МКСАШп	Магистральный, изоляция кордельно-трубчатая стирофлексная: диаметр корделя 0,8 мм, толщина стирофлексной ленты 0,05 мм; коэффициент укрутки 1,02; оболочка кабеля алюминиевая
МКСГ	Магистральный; изоляция кордельно-трубчатая, стирофлексная: диаметр корделя 0,8 мм, толщина стирофлексной ленты 0,05 мм; коэффициент укрутки 1,02; оболочка кабеля свинцовая
ТГ	Городской; изоляция трубчато-бумажная: 1 лента телефонной бумаги КТ толщиной 0,05 мм; шаг скрутки жил 70 мм; оболочка кабеля свинцовая, толщина 2 мм; строительная длина 500м

Таблица 7 – Характеристики систем передачи

Аналоговые системы передачи	
Название	Линейный спектр, кГц
К-60	12-252
К-300	60-1300
КРР-30	12-252 и 312-552
КАМА	12-252 и 312-552
Цифровые системы передачи	
Название	Скорость передачи кБит/с
ИКМ-30	2048

Таблица 8 – Температурный коэффициент затухания для кабелей МКС 4х4

f, кГц	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210
$\alpha_a \cdot 10^3$	3,71	2,92	2,45	2,28	2,18	2,14	2,11	2,09	2,06	2,04	2,02

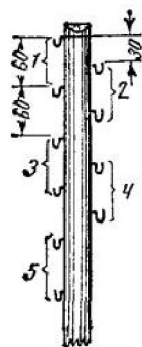
Воздушные линии

Таблица 1 – К расчету проводимости изоляции воздушных линий

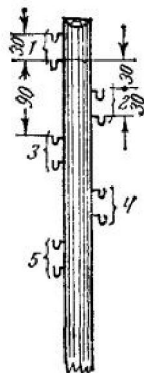
Погода	Значения параметров	
	$G_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	$n_r \cdot 10^{-9}$
сухая	0,01	0,05
сырая	0,05	0,25

Таблица 2 – Характеристики систем передачи воздушных линий связи

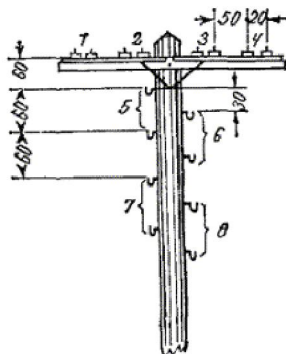
Система передачи	Линейный спектр, кГц
В-2-2	4,5...25,7
В-3-3	4...31
В-12-2	36...143



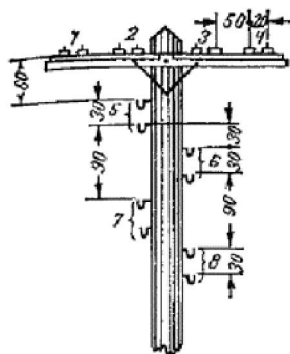
Профиль № 1



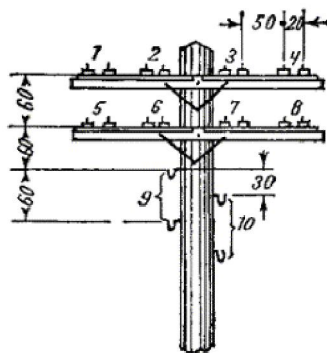
Профиль № 1a



Профиль № 2



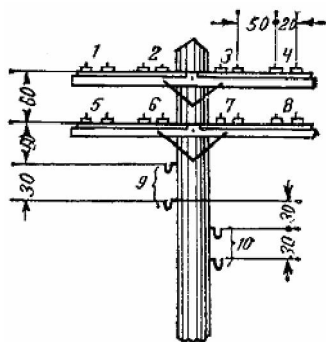
Профиль № 2a



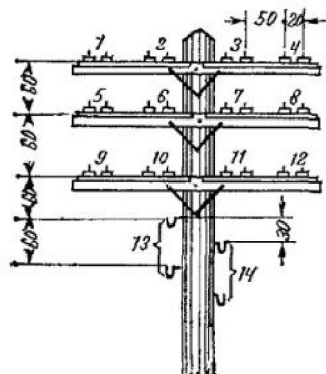
Профиль № 3

Рисунок 1 – Профили опор линий связи (начало)

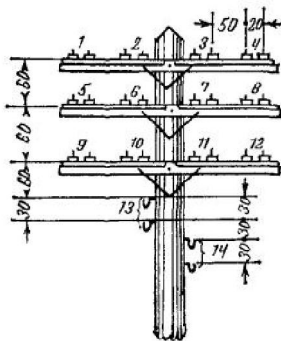
Направляющие среды электросвязи



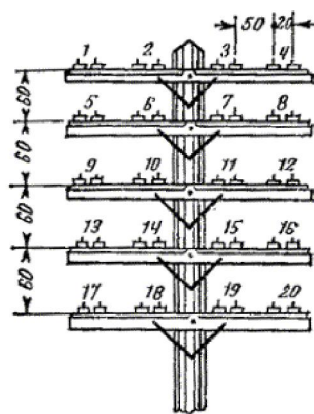
Профиль № 3а



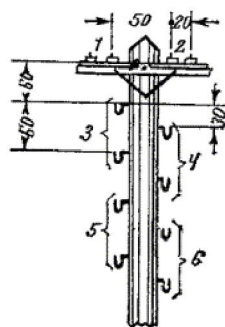
Профиль № 4



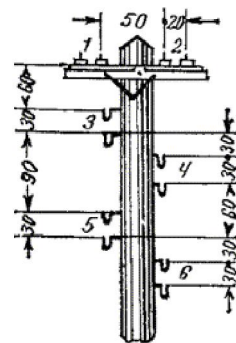
Профиль № 4а



Профиль № 5



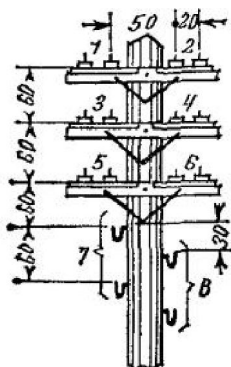
Профиль № 6



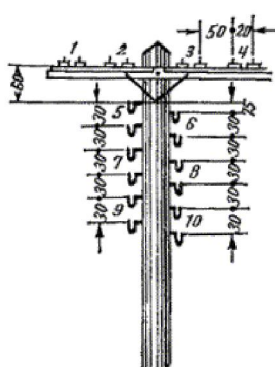
Профиль № 6а

Рисунок 1 – Профили опор линий связи (продолжение)

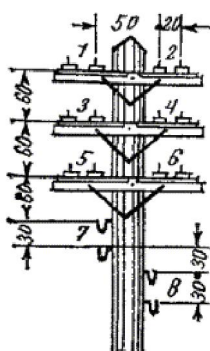
Направляющие среды электросвязи



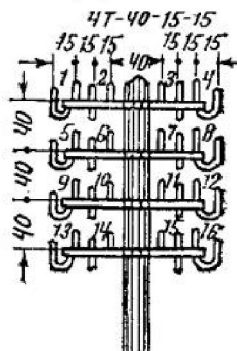
Профиль № 7



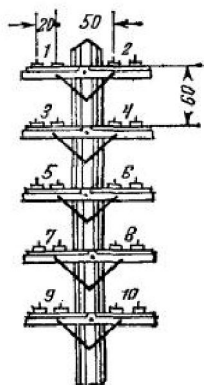
Профиль № 9



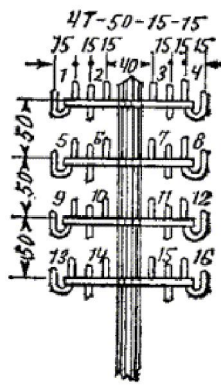
Профиль № 7a



Профиль № 10



Профиль № 8



Профиль № 11

Рисунок 1 – Профили опор линий связи (окончание)

Направляющие среды электросвязи

Коаксиальные кабели

Таблица 1 – Характеристики изоляции сложной структуры

Тип ка- беля	Тип изоляции	ϵ	V_d/V_v	$\lg \delta \cdot 10^{-4}$ при f [МГц]			
2,6/9,5	Полиэтиленовая шайба	1,13	8,9	1	5	10	60
2,6/9,5	Полиэтиленовая спираль	1,1	6	0,4	0,7	0,5	0,6
1,2/4,6	Балонно-полиэтиленовая	1,22	9	1,2	1,3	1,5	-
2,1/9,7	Пористо-полиэтиленовая	1,5	50	2	3	3	-
5/18	Кордельно-стирофлексная	1,19	12	0,7	0,8	1	1,2

Таблица 2 – Конструкция коаксиальных кабелей связи

Тип кабеля	Конструктивные особенности
МКТ-4	Магистральный, малогабаритный коаксиальный; проводники медные, толщина внешнего проводника 0,1 мм; изоляция воздушно-полиэтиленовая, баллонного типа; экран из двух стальных лент толщиной по 0,1 мм.
ВКПАШп-1	Зоновый, однокоаксиальный; внутренний проводник медный; внешний – алюминиевый; толщина внешнего проводника 0,8 мм; изоляция сплошная, из пористого полиэтилена; внешний проводник является экраном.
КМ-4	Магистральный, средний; проводники медные, толщина внешнего проводника 0,26 мм; изоляция шайбовая: толщина полиэтиленовых шайб 2,2 мм, расстояние между шайбами 25 мм; экран из двух стальных лент толщиной 0,15 мм.
КМ-8/6	Магистральный, комбинированный: 8 средних коаксиальных пар (2,6/9,5); 6 малогабаритных коаксиальных пар (1,2/4,6). <u>Средние пары:</u> медные проводники, толщина внешнего - 0,26 мм; изоляция шайбовая: толщина полиэтиленовых шайб 2,2 мм, расстояние между шайбами 25 мм; экран из двух стальных лент толщиной 0,15 мм. <u>Малогабаритные пары:</u> медные проводники, толщина внешне-го - 0,1 мм; изоляция воздушно-полиэтиленовая, баллонного типа; экран из двух стальных лент толщиной по 0,1 мм.

Таблица 3 – Системы передачи

Аналоговые системы передач	
Название	Линейный спектр, кГц
К-60	12-252
К-120	60-552 и 812-1 300
К-300	60-1 300
К-420	312-2 044 и 2 852-4 584
К-1920	312-8 500

Направляющие среды электросвязи

К-3600	812-17 600
К-5400	4332-31 100
К-10800	4332-60 000
Цифровые системы передач	
Название	Скорость передачи кБит/с
ИКМ-30	2 048
ИКМ-480	34 000
ИКМ-1920	140 000

Таблица 4 – Оптимальные соотношения диаметров проводников для различных металлов внешнего проводника при медном внутреннем

Материал внешнего проводника	Медь	Алюминий	Сталь	Свинец	Цинк
Отношение диаметров	3,6	3,9	4,2	5,2	4,3

Таблица 4 – Значения $Z_{\text{в}}$ в зависимости от ϵ_3 при $D/d=3,6$

ϵ_3	1,05	1,15	1,25	1,45	1,54
$Z_{\text{в}}$	75	67	61	53	50

Таблица 5 – Соотношение между ϵ_3 и D/d при нормированной величине волнового сопротивления $Z_{\text{в}} = 75 \text{ Ом}$

ϵ_3	1,0	1,05	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2,3
D/d	3,5	3,6	3,7	3,9	4,2	4,36	4,5	6,8

Таблица 6 - Оптимальные соотношения диаметров проводников

$\frac{D}{d}$	$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$	Свойства конструкции
3,6	$\frac{76,6}{\sqrt{\epsilon_3}}$	Минимум затухания
2,72	$\frac{59,9}{\sqrt{\epsilon_3}}$	Максимум электрической прочности на пробой
1,65	$\frac{30}{\sqrt{\epsilon_3}}$	Максимум передаваемой мощности

Оптические кабели

Таблица 1 – Параметры материалов элементов оптического кабеля

Материал	Удельный вес, г/см ³	Модуль упругости $\times 10^7$, Па
Сталь	7,9	20000
Медь	8,71...8,9	12000
Кварцевое волокно	2,48	8600
Алюминий	2,70	7000
Полиэтилен	0,92...0,93	15...25
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	0,92	20...30
Полиэтилен средней плотности (ПЭСП)	0,93	40...70
Полиэтилен высокой плотности (ПЭСП)	0,95	100
Фторопласт	2,1...2,3	225
Поливинилхлорид	1,3...1,7	300
Полистирол	1,04...1,06	120...150
Полиуретан	1,1...1,25	0,5...10
Нейлоновое волокно	1,14	600...1300
Кевларовое волокно	1,44	12500
Волокно СВМ	1,25	6500
Стеклопластик	2,0	500...600
Полибутилентерефталат	1,31	160
Полиамид	1,06	170
Поликарбонат	1,20	230
Арамидное волокно	1,45	10000
ПВХ пластикат	1,3	6
Стекло	2,5	7000

Оптический кабель типа ОК

Маркировка линейных оптических кабелей типа ОК: ОК-*a*-

b-c-d,

где

a – диаметр сердцевины оптического волокна, мкм;

b – номер разработки кабеля

2 – внешний диаметр оптического модуля 2,5 мм;

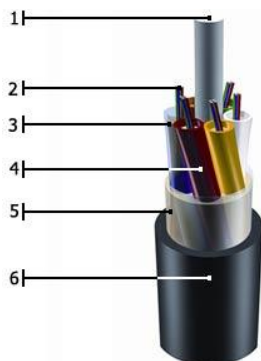
3 – внешний диаметр оптического модуля 2 мм;

c – коэффициент затухания, дБ/км;

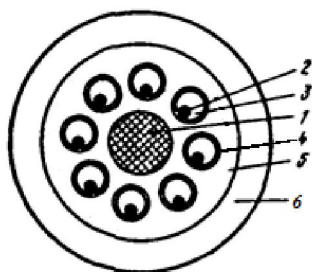
d – число оптических волокон в кабеле.

Конструкция линейных оптических кабелей типа ОК-50:

Направляющие среды электросвязи



- 1 – центральный упрочняющий элемент;
- 2 – оптическое волокно;
- 3 – внутримодульный гидрофобный наполнитель;
- 4 – оболочка оптического модуля;
- 5 – гидрофобное заполнение сердечника;
- 6 – внешняя оболочка.



- скрутка сердечника повивная вокруг центрального упрочняющего элемента;
- в каждом оптическом модуле содержится только одно градиентное оптическое волокно.

Наружный диаметр кабеля $13,0 \pm 1,0$ мм, толщина внешней полиэтиленовой оболочки $1,7 \pm 0,2$ мм.

Если кабель содержит 4 оптических модуля, они скручиваются в сердечник вместе с корделями заполнения. Диаметр корделя равен диаметру оптического модуля.

Допустимая нагрузка на растяжение линейного кабеля типа ОК: 1200 Н.

Рабочая длина волны 0,85 мкм.

Оптический кабель типа ОКСНМ

Маркировка кабеля оптического подвесного самонесущего ОКСНМ-*a-b-c-d (e)*:

a – диаметр модового поля, мкм;

b – материал Центрального силового элемента

01 – стеклопластик;

Направляющие среды электросвязи

c – коэффициент затухания, дБ/км;
 d – число оптических волокон в кабеле;
 e – допустимая нагрузка на растяжение, кН.

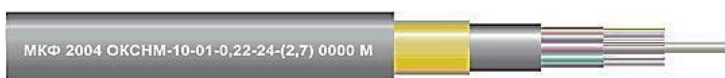
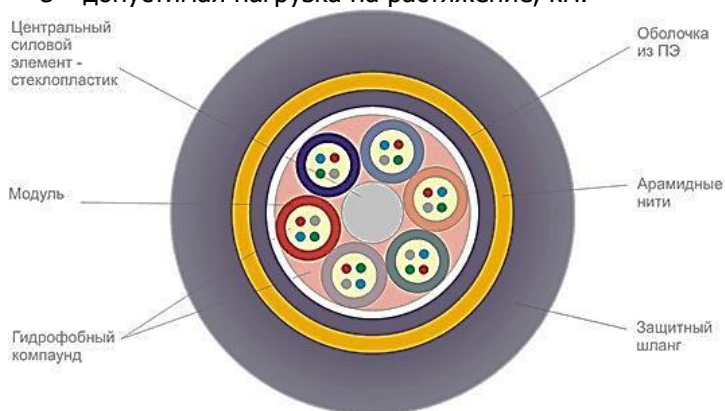


Таблица 2 - Модульная конструкция кабеля ОКСНМ- a - b - c - d (e)
 (n – количество модулей, m – количество волокон
 в каждом модуле):

Кол-во волокон	$n \cdot m$	Кол-во волокон	$n \cdot m$
4	1·4	18	1·2+4·4
6	1·2+1·4	20	5·4
8	2·4	24	6·4
10	1·2+2·4	32	4·8
12	3·4	36	1·4+4·8
16	4·4	48	6·8

Оптический кабель типа ОКК

Оптические кабели марки ОКК предназначены для использования на длине волны 1,3 мкм. Диаметр отражающей оболочки оптических волокон 125 ± 3 мкм.

Оптические кабели ОКК изготавливаются в двух вариантах:

- на основе градиентного оптоволокна с диаметром сердцевины 50 ± 3 мкм;
- на основе одномодового оптоволокна с диаметром модового пятна 10 ± 1 мкм.

Маркировка:

ОКК – оптический кабель для прокладки в канализации;

Направляющие среды электросвязи

ОККО – то же с броней в виде металлической оплетки;
 ОККС - то же с броней из стеклопластиковых стержней;
 ОККАК - то же в алюминиевой оболочке и с броней из круглых стальных проволок.

Рабочая длина волны кабеля типа ОКК-50: 1,3 мкм.

Оптический кабель типа ОКЛ

Линейные кабели марки ОКЛ предназначены для одномодовой связи на длине волны 1,55 мкм. Одномодовое ступенчатое оптическое волокно имеет следующие параметры:

- диаметр модового поля $8,5 \pm 1,0$ мкм,
- диаметр оболочки 125 ± 3 мкм.

Маркировка кабелей ОКЛ:

ОКЛ – оптический кабель линейный;

ОКЛС – то же с броней из стеклопластиковых стержней;

ОКЛБ - то же с броней из ленточной стали;

ОКЛК - то же с броней из круглых стальных проволок;

ОКЛАК - то же в алюминиевой оболочке и с броней из круглых стальных проволок.

Оптический кабель типа ОМЗКГ

ОМЗКГ – оптический магистральный и зонный кабель для прокладки в грунт. Предназначены для использования на длине волны 1,3 мкм.

Маркировка кабеля ОМЗКГ-*a-b-c-d*,

где *a* – диаметр сердцевины оптического волокна, мкм;

b – номер разработки кабеля

c – коэффициент затухания, дБ/км;

d – число оптических волокон в кабеле.

Кабель содержит одномодовые ступенчатые волокна.

Таблица 3 - Значения корней функций Бесселя для различных типов волн

n	Значение P_{nm} при m			Тип направляемой моды
	1	2	3	
0	2,405	5,520	8,654	E, H
1	0,000	3,832	7,016	HE
1	3,832	7,016	10,174	EH
2	5,136	8,417	11,620	EH
2	2,443	5,535	8,661	HE

Направляющие среды электросвязи

Таблица 4 – Удельная материальная дисперсия

λ , мкм	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,55	1,6	1,8
$M(\lambda)$, пс/(нм·км)	400	125	40	10	-5	-5	-18	-20	-25

Таблица 5 – Удельная волноводная дисперсия

λ , мкм	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,55	1,6	1,8
$B(\lambda)$, пс/(нм·км)	5	5	6	7	8	8	12	14	16

Таблица 6 – Удельная профильная дисперсия

λ , мкм	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,55	1,6	1,8
$\Pi(\lambda)$, пс/(нм·км)	0	1,5	2	2,5	4	5	5,5	6,5	7,5

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

- Из-за округления при расчетах приведенные контрольные значения могут неточно совпадать с полученными студентами данными.

Симметричные кабели связи

1 Элементы конструкции симметричных кабелей связи

- 1 Вес меди: 106,8 кг, вес свинца: 433,2 кг.
- 2 Расстояние между центрами пары 4,94 мм, диаметр звездной группы 8,44 мм.
- 3 Расстояние между центрами пары 4,17 мм, диаметр звездной группы 7,13 мм.
- 4 Расстояние между центрами пары 4,79 мм, диаметр звездной группы 8,19 мм.
- 5 Расстояние между центрами пары 4,65 мм, диаметр звездной группы 7,95 мм.
- 6 Отношение между центрами пары 105%

2 Первичные параметры передачи

- 1 Значения R : 34,68 Ом/км (4 кГц), 112,52 Ом/км (252 кГц), 163,87 Ом/км (553 кГц);
разность KPP-30 и ТЧ 129,19 Ом/км, KPP-30 и К-60 51,35 Ом/км, К-60 и ТЧ 77,84 Ом/км.
- 2 Значения R при 20°C: 37,32 Ом/км (12 кГц), 112,52 Ом/км (252 кГц);
значения R при -30°C: 30,04 Ом/км (12 кГц), 90,58 Ом/км (252 кГц);
разность R : 7,28 Ом/км (20°C), 21,94 Ом/км (-30°C).
- 3 Значение L : 0,909 мГн/км (4 кГц), 0,852 (252 кГц);
отношение L : 1,07.
- 4 Значения C : 18,95 нФ/км (идеальная), 22,78 нФ/км (реальная);
разность C : 3,83 нФ/км.
- 5 Значения G : 276,81 мкСм/км (1,2 мм), 612,21 мкСм/км (1,05 мм);
отношение G : 2,21.
- 6 Значения R : 116,63 Ом/км (первый повив), 120,56 Ом/км (второй);
отношение R : 1,03.

7 Значения R , кабель МКПГ: 162,94 Ом/км (первый повив), 168,84 Ом/км (второй);
Значения R , кабель МКПА: 161,65 Ом/км (первый повив), 162,94 Ом/км (второй);
отношение R : 1,009 (для первых повивов), 1,036 (для вторых).

3 Первичные параметры передачи воздушных линий

1 Значения R для стальных проводов: 79,55 Ом/км (4 кГц), 210,08 Ом/км (31 кГц);
значения R для медных проводов: 3,42 Ом/км (4 кГц), 8,04 Ом/км (31 кГц);
отношение R : 23,26 (4 кГц), 26,13 (31 кГц).

2 Значения R для В-3-3: 3,42 Ом/км (нижняя частота), 8,04 Ом/км (верхняя);
значения R для В-12-2: 8,62 Ом/км (нижняя), 16,30 Ом/км (верхняя);
разность R : 5,2 Ом/км (нижняя), 8,26 (верхняя).

3 Значения R для 25°: 85,36 Ом/км (4,5 кГц), 196,18 Ом/км (25,7 кГц);
значения R для -20°: 64,91 Ом/км (4,5 кГц), 156,48 Ом/км (25,7 кГц);
разность R : 20,45 Ом/км (4,5 кГц), 39,7 Ом/км (25,7 кГц).

4 Значения R для 30°: 9,02 Ом/км (36 кГц), 17,05 Ом/км (143 кГц);
значения R для -20°: 7,03 Ом/км (36 кГц), 13,30 Ом/км (143 кГц);
разность R : 1,99 Ом/км (36 кГц), 3,75 Ом/км (143 кГц).

5 Значения L для стальных проводов: 6,13 мГн/км (4 кГц), 3,67 мГн/км (31 кГц);
значения L для медных проводов: 2,37 мГн/км (4 кГц), 2,32 мГн/км (31 кГц);
разность L : 3,76 (4 кГц), 1,44 (31 кГц).

6 Значения L для 8 цепи: 1,88 мГн/км (36 кГц), 1,86 мГн/км (143 кГц);
для 9 цепи: 2,32 мГн/км (36 кГц), 2,30 мГн/км (143 кГц);
разница: для обеих частот 0,44 мГн/км.

7 Значения L для 4 цепи: 5,48 мГн/км (4,56 кГц), 3,36 мГн/км (25,7 кГц);
для 5 цепи: 5,64 мГн/км (4,56 кГц), 3,53 мГн/км (25,7 кГц);
разница: 0,16 мГн/км (4,56 кГц), 0,17 мГн/км (25,7 кГц).

8 Значения L для В-3-3: 6,13 мГн/км (нижняя частота), 3,67 мГн/км (верхняя);

Направляющие среды электросвязи

для 5 цепи: 5,92 мГн/км (нижняя), 3,80 мГн/км (верхняя);
разница: 0,21 мГн/км (нижняя), -0,13 мГн/км (верхняя).

9 Значения C : 6,03 нФ/км (12 цепь), 5,54 (13 цепь);
разность 0,49 нФ/км.

10 Значения G для В-3-3: 0,21 мкСм/км (нижняя частота),
1,56 мкСм/км (верхняя);
значения G для В-12-2: 1,81 мкСм/км (нижняя), 7,16 (верхняя);
отношение G : 8,62 (нижняя), 4,59 (верхняя).

4 Вторичные параметры передачи

1 $199,76 \cdot e^{-2,20^\circ i}$ Ом (12 кГц), 192,8 Ом (552 кГц).

2 $3,39 \cdot 10^5$ Ом.

3 Значение α при 20°C: 0,1 Нп/км = 0,87 дБ/км (12 кГц),
0,33 Нп/км = 2,89 дБ/км (252 кГц);
значение α при -30°C: 0,71 дБ/км (12 кГц), 2,6 дБ/км (252 кГц)

4 0,35 рад/км.

5 Значение κ : $215,93 \cdot 10^3$ км/с (МКСГ), $215,31 \cdot 10^3$ км/с (МКГ);
разность: 620 км/с.

6 Значения Z_b : 174,45 Ом (1,2 мм), 184,69 Ом (1,05 мм);
разность 10,24 Ом.

7 Значения β : $215,31 \cdot 10^3$ км/с (1,2 мм), $209,31 \cdot 10^3$ км/с (1,05 мм);
разность 6000 км/с.

8 $258,05 \cdot e^{-27,7^\circ i}$ Ом (12 кГц), 199,03 Ом (252 кГц).

9 Значение α : 0,15 Нп/км, 0,71 Нп/км;
разность 0,56 Нп/км.

5 Вторичные параметры передачи воздушных линий

1 Значения Z_b в сухую погоду: $698,18 \cdot e^{-1,69^\circ i}$ Ом (12 кГц),
 $690,26 \cdot e^{-0,46^\circ i}$ Ом (31 кГц);

значения Z_b в сырую погоду: $698,17 \cdot e^{-1,4^\circ i}$ Ом (12 кГц),
 $690,28 \cdot e^{-0,27^\circ i}$ Ом (31 кГц)

2 Значение α в сухую погоду: 0,008 Нп/км (36 кГц), 0,017 Нп/км
(143 кГц);

значение α в сырую погоду: 0,01 Нп/км (36 кГц), 0,025 Нп/км (143
кГц);

разница 0,002 Нп/км (36 кГц), 0,008 (143 кГц).

3 Значение β для стальных проводов: 0,14 рад/км (4 кГц),
0,85 рад/км (31 кГц);

значение β для медных проводов: 0,09 рад/км (4 кГц), 0,65 рад/км
(31 кГц);

Направляющие среды электросвязи

разница: $0,05 \text{ рад/км}$ (4 кГц), $0,2 \text{ рад/км}$ (31 кГц).

4 Значение v : $292,96 \cdot 10^3 \text{ км/с}$ (В-3-3), $296,99 \cdot 10^3 \text{ км/с}$ (В-12-2);
разность $4,03 \cdot 10^3 \text{ км/с}$.

5 Значение v : $297 \cdot 10^3 \text{ км/с}$ (36 кГц), $298,6 \cdot 10^3 \text{ км/с}$ (143 кГц);
разность $1,6 \cdot 10^3 \text{ км/с}$.

Коаксиальные кабели связи

1 Первичные параметры передачи

1 Значение R : $12,47 \text{ Ом/км}$ (упрощенная формула), $13,61 \text{ Ом/км}$ (полная формула);

разность $1,2 \text{ Ом/км}$.

2 Значение R : $342,23 \text{ Ом/км}$ (упрощенная формула), $339,56 \text{ Ом/км}$ (полная формула);

разность $2,67 \text{ Ом/км}$.

3 $5,21 \text{ Ом/км}$

4 Значение L : $3,26 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$ (упрощенная формула), $3,13 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$ (полная формула);

разность $0,13 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$.

5 Значение L : $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$ (упрощенная формула), $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$ (полная формула);

разность 0 Гн/км .

6 Значения C : $48,45 \text{ нФ/км}$ (стандартная изоляция), $50,16 \text{ нФ/км}$ (нестандартная);

разность $1,71 \text{ нФ/км}$.

7 Значения G : $64,65 \text{ мСм/км}$ (стандартная изоляция), $198,96 \text{ мСм/км}$ (нестандартная);

разность $134,31 \text{ нФ/км}$.

8 Значения G : $64,65 \text{ мСм/км}$ (средняя пара), $807,74 \text{ мСм/км}$ (малогабаритная);

разность $743,09 \text{ нФ/км}$.

2 Вторичные параметры передачи

1 Значения Z_B : $73,1 \text{ Ом}$ (КМ-8/6), $72,95 \text{ (МКТ-4)}$;

разность $0,15 \text{ Ом}$.

2 Значения Z_B : $73,1 \text{ Ом}$ (КМ-8/6), $75,83 \text{ (ВКПАШп-1)}$;

разность $2,73 \text{ Ом}$.

3 Значения α : $20,84 \text{ дБ/км}$ (полная формула), $20,88 \text{ дБ/км}$ (упрощенная);

разность: 0,04 дБ/км.

4 Значения α : 3,35 дБ/км (полная формула), 3,23 дБ/км (упрощенная);

разность: 0,12 дБ/км.

5 Значения β : 391,64 рад/км (К-3600), 786,14 рад/км (ИКМ-480);
отношение: 2,01.

6 Значения β : 1557,67 рад/км (ИКМ-1920), 393,07 рад/км (ИКМ-480);

отношение: 3,96.

7 Значение v : 242147,43 км/с (1300 кГц), 232670,36 км/с (60 кГц);

разность 9477,06 км/с.

8 Значение v : 265604,77 км/с (1300 кГц), 246634,05 км/с (60 кГц);

разность 18970,72 км/с.

3 Влияние соотношения размеров проводников на параметры передачи

1 42 мм.

2 2,40 дБ/км.

3 3003,04 рад/км и 292770,02 км/с.

4 9,62 мм.

5 2,28 мм.

6 48,3 мм (медные проводники), 10,35 мм (внешний алюминиевый); разность: 37,95 мм.

Оптические кабели

1 Нагрузка на растяжение

1 Значения F : 4401,8 Н (старые параметры), 4985,7 Н (новые);
разница 583,9 Н.

2 $42,66 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

3 Значения F : 7724,3 Н (СВМ), 20981,3 Н (сталь);
разница 13257 Н.

4 Значения F : 8822,2 Н (ОК-50-2-3-8), 9681 Н (ОК-50-2-3-4);
разница 858,8 Н.

5 Значения F : 5675 Н (0,2 мм), 6874,2 Н (0,25 мм);

толщина 0,2 мм не удовлетворяет требованиям, 0,25 - удовлетворяет.

6 0,193 мм.

7 Значения F : 4036,1 Н (ОК-50-2-3-4), 3711,1 Н (ОК-50-3-3-4);

разница 325 Н.

2 Основные параметры

1 163 (50 мкм), 144 (нижняя граница нормы), 184 (верхняя);
разница 40 мод.

2 Значения V : 27,29 (ОКК), 3,89(ОКЛБ);
соотношение 7.

3 Значение M : 0,2254 (ОКК), 0,2258 (ОКЛБ); разница 0,0004.

4 $1,3 \cdot 10^{14}$ Гц (8,5 мкм), $1,47 \cdot 10^{14}$ Гц (нижняя граница нормы),
 $1,16 \cdot 10^{14}$ Гц (верхняя);
разница 31 ТГц.

5 E_{01} : $1,2 \cdot 10^{14}$ Гц и 1,67 мкм;
 E_{H11} $1,91 \cdot 10^{14}$ Гц и 1,05 мкм;
разница: 71 ТГц и 0,62 мкм.

3 Затухание

1 Значение потерь на рассеяние: 0,14 дБ/км (третье окно прозрачности), 0,28 дБ/км (второе);
разница 0,14 дБ/км.

2 0,577 дБ/км (1,8 мкм), 0,636 дБ/км (2,3 мкм), 0,689 дБ/км (2,9 мкм).

3 1,08 дБ/км.

4 0,46 дБ

5 5 дБ

6 2,39 дБ (за счет углового смещения), 0,14 дБ (за счет осевого смещения), 2,53 (общие дополнительные потери).

4 Дисперсия

1 Значение межмодовой дисперсии: 0,26 мкс (ступенчатый профиль), 1,287 нс (градиентный);
отношение 201,9.

2 Значение хроматической дисперсии: 0,264 нс (лазер), 124,8 нс (светодиод);
отношение: 472,7.