

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ИСПОЛНЕНИЯ НАКАЗАНИЙ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ КАЗЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ВОРОНЕЖСКИЙ ИНСТИТУТ ФСИН РОССИИ**

**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ
по дисциплине
Направляющие системы электросвязи**

**специальность 210406.65 – Сети связи и системы коммутации
(форма обучения, заочная)**

Воронеж – 2012г.

ПРИМЕЧАНИЕ

Выбор варианта задачи необходимо производить по последней цифре № зачетной книжки, если задач меньше десяти вариант задачи выбирается сложением двух последних цифр № зачетной книжки.

Контрольное задание №1

Расчет элементов конструкций симметричных кабелей

Методические указания

Умение производить расчеты элементов конструкций симметричных кабелей может оказаться особенно необходимым специалистам в области кабельных сетей. Это обусловлено тем, что существует большое разнообразие типов городских низкочастотных симметричных кабелей, использующих различные методы скрутки проводников. От того, какой вид скрутки был использован, зависит степень широкополосности кабеля и чувствительность к взаимным влияниям. При выборе групп симметричных пар, подверженных наименьшим влияниям, следует не только вспомнить методы образования повивов кабеля, но и рассчитать диаметр искомого повива или других элементов конструкции кабеля.

В симметричных кабелях применяется несколько способов скрутки изолированных проводников в группы:

- *парная скрутка (П)* – два изолированных проводника скручиваются в пару с шагом скрутки не более 300 мм;
- *скрутка звездой (З)* – четыре изолированных проводника, расположенные по углам квадрата, скручиваются с шагом скрутки 150-300 мм;
- *скрутка двойная пара (ДП)* – две предварительно свитые пары скручиваются между собой в четверку с шагом 150-300 мм;
- *скрутка двойной звездой (ДЗ)* – четыре предварительно свитые пары скручиваются вместе по способу звезды с шагом 200-400 мм, образуя восьмерку;
- *восьмерочная скрутка (В)* – восемь жил группы располагаются концентрически вокруг сердечника из изолированного материала.

Геометрические размеры кабеля зависят от диаметра группы, образующей основополагающую единицу конструкции. В случае парной скрутки толщина, прибавляемая каждым повивом к диаметру кабеля, будет равна средней ширине пространства, занимаемого парой (рис.1.1). При этом, как видно из рисунка, эта толщина не будет равна двойному диаметру изолированной жилы – $2d_1$.

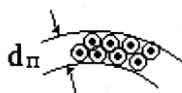


Рис.1. Ширина пространства повива

На практике при скрутке проводников с воздушно-бумажной изоляцией происходит их деформация, в результате чего размеры скрученных групп

становятся меньше, чем расчетные. Для таких конструкций кабелей вводится понятие эффективного диаметра группы – $d_э$, который определяется произведением диаметра группы на коэффициент, зависящий от типа скрутки.

Таблица 1

Скрутка	Коэффициент	Эффективный диаметр
Парная $d_п$	0,965	0,965 $d_п$
Звездная $d_з$	0,909	0,909 $d_з$
Двойная парная $d_{дп}$	0,956	0,956 $d_{дп}$
Двойная звездная $d_{дз}$	0,980	0,980 $d_{дз}$
Восьмеречная $d_в$	0,983	0,983 $d_в$

Повивная скрутка является основным методом общей скрутки сердечника кабеля. Группы располагают последовательными концентрическими слоями (повивами) вокруг центрального повива, состоящего из одной – пяти групп (рис.2). При этом диаметр центрального повива определяется из формулы $D = d \left[1 + \frac{1}{\sin(180/n)} \right]$ (1.2). Зная число групп в центральном (первом) слое кабеля, можно определить число групп второго и последующих слоев.

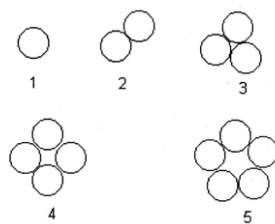


Рис.2. Пять различных форм скрутки с 1, 2, 3, 4, и 5 группами в центральном повиве

Ввиду того, что группы каждого последующего слоя накладываются на предыдущий по винтовой линии, длина жил увеличивается по сравнению с длиной кабеля. Эта величина удлинения характеризуется коэффициентом укрутки $\chi = \left[1 + \pi^2 \left(\frac{D}{h} \right)^2 \right]^{1/n}$ (1.1), который показывает, во сколько раз группа длиннее оси кабеля. В зависимости от типа кабеля и его размеров коэффициент укрутки принимается $\chi=1,01-1,07$. Вследствие расположения группы проводников вокруг сердечника по винтовой линии в повиве они занимают пространство несколько большее, чем в случае параллельного расположения к оси кабеля. Число групп во втором слое определяется из выражения:

$$n_{II} = \frac{\pi(D_I + d)}{\chi d}, \quad (1)$$

где

D_I – диаметр первого (центрального) повива;

d – диаметр группы проводников;

χ – коэффициент укрутки.

Число групп в третьем слое определяется из выражения:

$$n_{III} = \frac{\pi(D_{II} + d)}{\chi d} = n_{II} + 6, \quad (2)$$

где

D_{II} – диаметр первого (центрального) повива;

n_{II} – число групп во втором повиве.

Для упрощенных расчетов можно считать, что число групп в каждом последующем слое увеличивается на шесть по сравнению с предыдущим. Исключением из этого правила является только второй слой в том случае, когда в первом (центральном) содержится одна группа. При таком построении сердечника кабеля во втором слое увеличение будет не на 6, а на 5 групп.

Варианты задач

Задача 1. Во сколько раз отличается толщина повивов, состоящих из двух разных типов групп проводников. Если в первом случае использована парная скрутка, а во втором – звездная скрутка? На сколько изменится это соотношение в случае дополнительного обжима бумажной изоляцией?

Задача 2. На сколько процентов отличается длина проводников, используемых во втором и в четвертом повиве в кабеле ТГ100×2 с диаметром токопроводящих жил 0,5 мм, покрытых стандартной лентой телефонной бумаги, шаг скрутки жил – 100 мм.

Задача 3. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле МКС-7×4×1,2, и определить диаметр звездной группы.

Задача 4. Определить сколько кг меди и свинца находится в строительной длине кабеля ТГ 10×2×0,5.

Задача 5. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле с кордельно-бумажной изоляцией МКГ-4×4×1,2 и определить диаметр звездной группы.

Задача 6. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле с балонно-полиэтиленовой изоляцией МКПГ-4×4×1,2 и определить диаметр звездной группы.

Задача 7. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле со сплошной полиэтиленовой изоляцией МКПВ-1×4×1,2 и определить диаметр звездной группы.

Задача 8. Найти расстояние между центрами пары проводников, находящихся внутри четверки в кабеле с пористо-полиэтиленовой изоляцией МКПП-1×4×1,2 и определить диаметр звездной группы.

Список литературы

1. Гроднев И.И., Верник С.М. Линии связи. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Барон Д.А., Гроднев И.И. и др. Справочник. Строительство кабельных сооружений связи. – М.: Радио и связь, 1988.
3. Ионов А.Д., Попов Б.В. Линии связи: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1988.

4. Цым А.Ю., Камалягин В.И. Междугородные симметричные кабели для цифровых систем передачи. – М.: Радио и связь, 1984.

5. Андреев В.А., Портнов Э.Л., Кочановский Л.Н. Направляющие системы электросвязи. Том1. Теория передачи и влияния. – М.: Горячая линия – Телеком. 2009.

6. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Учебное пособие. - М.: Горячая линия – Телеком. 2004.

Контрольное задание №2

Расчет первичных параметров симметричных цепей

Методические указания

Расчет сопротивления

Уравнение для расчета цепи (1.3) состоит из трех слагаемых: сопротивление постоянному току - $2R_0$, сопротивление за счет поверхностного эффекта - $2R_0 F_9(kr)$ и сопротивление за счет эффекта близости - $\frac{2R_0 pG(kr)(d/a)^2}{1-H(kr)(d/a)^2}$. Однако в кабелях связи, как правило, имеются

несколько четверок, поэтому необходимо учитывать влияние соседних металлических элементов на рост дополнительных потерь. Это влияние учитывается как дополнительное сопротивление R_M , обусловленное потерями на вихревые токи в соседних проводах и металлической оболочке. Оно определяется для различных частот из выражения:

$$R_M = R_{M.T.} \sqrt{\frac{f}{200}},$$

где $R_{M.T.}$ находится как табличные значения (табл.2) сопротивления потерь на частоте 200кГц в смежных четверках и металлической оболочке, Ом/км;
 f – частота сигнала, кГц.

Величина $R_{M.T.}$ суммируется при наличии в конструкции кабеля смежных четверок и металлических оболочек.

Таблица 1

Сопротивление дополнительных потерь $R_{M.T.}$, Ом/км

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

Для низкочастотных симметричных кабелей и для воздушных линий связи можно не учитывать сопротивление цепи по формуле:

$$R = 2R_{0\chi} [1 + F(kr)], \text{ Ом/км.} \quad (1)$$

Сопротивление одного проводника постоянному току определяется по формуле (1.4).

Таблица 2

Наименование металла	Удельное сопротивление при $t=20^{\circ}\text{C}$, $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$
Медь	0,0175
Алюминий	0,0295
Сталь	0,138
Цинк	0,062

Как видно из приведенных выражений (1.3) и (1) для определения сопротивления цепи необходимо сначала найти специальные функции Бесселя $F(kr)$, $G(kr)$, $H(kr)$. Их значения представлены в табл. 4. Аргументом этих функций является произведение коэффициента вихревых токов на радиус голого проводника kr . Величину коэффициента вихревых токов можно определить из выражения

$$k = \omega \mu_a \sigma,$$

где $\mu_a = \mu_0 \mu_r$ - абсолютная магнитная проницаемость; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4} \text{ Гн/км}$ - магнитная проницаемость вакуума; μ_r - относительная магнитная проницаемость для проводника (для медных проводников $\mu_r=1$, для алюминиевых $=1$, для стальных $=130$, для свинца $=1$). Значения kr и k даны в табл.3.

Таблица 3

Материал проводника	$k = \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$, мм^{-1}	kr
Медь	$0,021 \sqrt{f}$	$0,0105 \sqrt{f}$
Алюминий	$0,0164 \sqrt{f}$	$0,082 \sqrt{f}$
Сталь	$0,075 \sqrt{f}$	$0,0375 \sqrt{f}$

Величина f подставляется в Гц;

d – (диаметр голого проводника $=2r$) подставляется в мм.

Значения специальных функций Бесселя $F(kr)$, $G(kr)$, $H(kr)$ даны в табл.4.

Таблица 4

kr	$F(kr)$	$G(kr)$	$H(kr)$	$Q(kr)$
0	0	$\frac{(kr)^4}{64}$	0,0417	1
0,5	0,000326	0,000975	0,042	0,9998
1,0	0,00519	0,01519	0,053	0,997
1,5	0,0258	0,0691	0,092	0,987
2,0	0,0782	0,1724	0,169	0,961
2,5	0,1756	0,295	0,263	0,913
3,0	0,318	0,405	0,348	0,845
3,5	0,492	0,499	0,416	0,766
4,0	0,678	0,584	0,466	0,686
4,5	0,862	0,669	0,503	0,616
5,0	1,042	0,755	0,530	0,556
7,0	1,743	1,109	0,596	0,400

10,0	2,799	1,641	0,643	0,282
>10,0	$\frac{\sqrt{2kr}-3}{4}$	$\frac{\sqrt{2kr}-1}{4}$	$\frac{1}{4} \left[\frac{3\sqrt{2kr}-5}{\sqrt{2kr}-1} - \frac{2\sqrt{2}}{kr} \right]$	$\frac{2\sqrt{2}}{kr}$

Для расчета сопротивления цепи также требуется определить расстояние между центрами проводников a . Эту величину необходимо определять для каждого типа кабеля отдельно, так как она зависит от типа скрутки, вида изоляции. Она определяется решением элементарных геометрических задач. Так для кабеля типа МКС-4×4×1,2 нахождение этой величины показано в задаче №3.

При расчетах температурной зависимости сопротивления симметричных пар следует учесть, что изменение температуры окружающей среды вносит наибольшее изменение в сопротивление подвесных кабелей и воздушных линий связи, так как температура на глубине прокладки кабеля практически остается неизменной в течение года. Сопротивление проводов при температуре t , отличной от 20°C , рассчитывается по формуле (1.6). Температурные коэффициенты сопротивления α_R представлены в табл.5.

Таблица 5

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

Расчет индуктивности

Индуктивность цепи L характеризуется отношением магнитного потока Φ к току I , создавшему этот поток - $L = \frac{\Phi}{I}$. Она состоит из внешней межпроводниковой индуктивности $L_{\text{вн}}$ и внутренней индуктивности каждого проводника L_a и определяется по формуле (1.7).

Внешняя индуктивность имеет наибольшее значение (порядка 60-90%). Внутренняя индуктивность по абсолютной величине значительно меньше внешней и с ростом частоты существенно снижается.

Значение $Q(kr)$ и аргумент функции kr определяются по аналогии с другими специальными функциями Бесселя $F(kr)$, $G(kr)$, $H(kr)$ из табл. 3 и 4. Методика нахождения этих параметров рассмотрена при расчете сопротивления симметричных пар.

Расчет емкости

Емкость характеризует способность поляризации и величину токов смещения в изоляции симметричных цепей. Ее величина определяется по формулам (1.8) и (1.9) соответственно для расчетов идеальной симметричной цепи без влияния соседних металлических масс и в цепи в реальных конструкциях кабеля. В последнем случае следует учитывать поправочный коэффициент ψ , характеризующий близость проводников к заземленной

оболочке и другим проводникам. Коэффициент ψ для различных видов группирования кабелей определяется по формулам, представленным в табл.6.

Таблица 6

Тип скрутки	Поправочный коэффициент
Парная	$\Psi_i = \frac{(d_i + d_1 - d)^2 - \dot{a}^2}{(d_i + d_1 - d)^2 + \dot{a}^2}$
Звездная	$\Psi_\varsigma = \frac{(d_\varsigma + d_1 - d)^2 - \dot{a}^2}{(d_\varsigma + d_1 - d)^2 + \dot{a}^2}$
Двойная парная	$\Psi_{\dot{A}\dot{I}} = \frac{(0,65d_{\dot{A}\dot{I}} + d_1 - d)^2 - \dot{a}^2}{(0,65d_{\dot{A}\dot{I}} + d_1 - d)^2 + \dot{a}^2}$

где

d – диаметр голого проводника;

d_1 – диаметр изолированного проводника;

d_{Π} – диаметр парной скрутки;

d_3 – диаметр звездной скрутки;

$d_{\text{ДП}}$ – диаметр двойной парной скрутки.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость среды - ϵ_a связана с относительной диэлектрической проницаемостью – ϵ_r выражением:

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, равная (в системе СИ) $\frac{10^{-9}}{36\pi}$ Ф/м.

Относительная диэлектрическая проницаемость всех материальных тел больше 1, или, другими словами, всякая материальная среда уменьшает напряженность электрического поля, созданного зарядом, по сравнению с полем в пустоте.

В ряде случаев возникает необходимость в расчете эквивалентной относительной диэлектрической проницаемости изоляции, особенно при различных соотношениях твердого диэлектрика и воздуха. Ее величина будет определяться из выражения:

$$\epsilon_y = \frac{\epsilon_1 S_1 + \epsilon_2 S_2}{S_1 + S_2}, \quad (3)$$

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

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

Кабели связи, как правило, имеют сложную комбинированную изоляцию. Результирующие эквивалентные значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ_y при таких комбинированных изоляциях приведены в табл.7.

Таблица 7

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

Расчет проводимости

Проводимость изоляции G характеризует потери энергии в изоляции проводов кабеля. Проводимость изоляции обусловлена сопротивлением изоляции изолирующего материала и диэлектрическими потерями. Ее величина определяется из выражения (1.10). Для кабельных симметричных цепей величина $G_0 = \frac{1}{R_{\epsilon\epsilon}}$ очень мала по сравнению с G_f и ей можно пренебречь. Величину G_0 следует учитывать при расчетах проводимости изоляции на воздушных линиях связи и при расчете проводимости изоляции по постоянному току.

Сопротивление изоляции $R_{из}$ междугородных кабелей нормируется величиной 10000 МОм·км, в городских кабелях – 2000 МОм·км. С увеличением температуры окружающей среды сопротивление изоляции уменьшается. Сопротивление изоляции при температуре отличной от 20°C рассчитывается по формуле:

$$R_{\epsilon\epsilon, T} = R_{\epsilon\epsilon, 20^0} T, \text{ Ом} \cdot \text{км}, \quad (4)$$

где

T – поправочный коэффициент (табл.8);

$R_{\epsilon\epsilon, 20^0}$ – сопротивление изоляции при температуре 20°C (стандартные нормированные величины).

Таблица 8

Вид изоляции	Т при температуре, °С							
	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

По аналогии с диэлектрической проницаемостью (3) в ряде случаев возникает необходимость в расчете эквивалентной величины $\text{tg}\delta$. Ее величина будет определяться из выражения:

$$\text{tg}\delta_y = \frac{\epsilon_1 \text{tg}\delta_1 S_1 + \epsilon_2 \text{tg}\delta_2 S_2}{\epsilon_1 S_1 + \epsilon_2 S_2}, \quad (5)$$

где

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

S_1 и S_2 – площади поперечного сечения первого и второго диэлектрика;

$\text{tg}\delta_1$ и $\text{tg}\delta_2$ – тангенс угла диэлектрических потерь первого и второго диэлектрика.

Результирующие эквивалентные значения тангенса диэлектрических потерь при комбинированных изоляциях приведены в табл.7.

Варианты задач

Задача 1. Определить, на сколько изменится сопротивление симметричной цепи в кабеле МКСГ-4×4, если в первом случае по ней

организован один стандартный канал тональной частоты, во втором случае была использована система передачи К-60, в третьем случае – ИКМ-30. Расчеты проводить на верхних частотах передаваемых сигналов.

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

Задача 3. Определить, на сколько отличается емкость идеальной симметричной цепи от емкости реальной симметричной цепи, находящейся в кабеле МКСГ-4×4, если параметры идеальной цепи и симметричной цепи кабеля МКСГ совпадают.

Задача 4. Определить, во сколько раз изменится проводимость изоляции симметричной пары, если она в первом случае находится в кабеле МКСГ-4×4, а во втором случае – в МКГ-4×4. На кабелях работает система передачи К-60. Расчеты проводить на верхней и нижней частоте системы передачи.

Задача 5. Определить, на сколько изменится сопротивление симметричной цепи в кабеле МКГ 4×4, если в первом случае по ней организован один стандартный канал тональной частоты, во втором случае была использована система передачи КРР-30, в третьем случае К-60. Расчеты проводить на верхних частотах передаваемых сигналов.

Задача 6. Определить, на сколько изменится сопротивление симметричной цепи в кабеле МКСГ 4×4, если в первом случае кабель находится в среде с температурой $t=+20^{\circ}\text{C}$, во втором случае – в среде с температурой $t=-20^{\circ}\text{C}$. По симметричной цепи работает система передачи К-60. Расчеты проводить на верхней и нижней частоте передаваемых сигналов.

Задача 7. Определить, на сколько изменится сопротивление симметричной цепи воздушной линии связи, если в первом случае симметричная цепь находится в среде с температурой $t=+30^{\circ}\text{C}$, во втором случае – в среде с температурой $t=-30^{\circ}\text{C}$. По симметричной цепи из стальных проводов диаметром $d=4$ мм работает система передачи В-3-3. Расчеты проводить на верхней и нижней частоте передаваемых сигналов.

Задача 8. Определить, во сколько изменится внутренняя индуктивность симметричной цепи в кабеле МКГ 4×4, если в первом случае по ней организован один стандартный канал тональной частоты, а во втором случае была использована система передачи К-60. Чем будут при этом равны общие значения индуктивности данной симметричной цепи. Расчеты проводить на верхних частотах передаваемых сигналов.

Задача 9. Определить, на сколько изменится индуктивность первой симметричной цепи профиля №3 в воздушной линии связи, если в первом случае на ней использованы стальные провода диаметром $d=4$ мм, а во втором – медные провода того же диаметра. По симметричной цепи

работает система передачи В-3-3. Расчеты проводить на верхней и нижней частоте передаваемых сигналов.

Задача 10. Определить, на сколько отличается емкость идеальной симметричной цепи от реальной симметричной цепи, находящейся в кабеле МКГ 4×4, если параметры идеальной цепи и симметричной цепи кабеля МКГ совпадают.

Список литературы

1. Гроднев И.И., Верник С.М. Линии связи. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Барон Д.А., Гроднев И.И. и др. Справочник. Строительство кабельных сооружений связи. – М.: Радио и связь, 1988.
3. Ионов А.Д., Попов Б.В. Линии связи: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1988.
4. Цым А.Ю., Камалыгин В.И. Междугородные симметричные кабели для цифровых систем передачи. – М.: Радио и связь, 1984.
5. Андреев В.А., Портнов Э.Л., Кочановский Л.Н. Направляющие системы электросвязи. Том 1. Теория передачи и влияния. – М.: Горячая линия – Телеком. 2009.
6. Ксенофонов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Учебное пособие. – М.: Горячая линия – Телеком. 2004.

Контрольное задание №3

Расчет вторичных параметров симметричных цепей

Методические указания

Расчет волнового сопротивления

При расчете $Z_{\text{в}}$ следует помнить. Что по своей природе волновое сопротивление не зависит от длины кабельной линии и постоянно в любой точке, однако оно существенно зависит от частоты. При постоянном токе волновое сопротивление следует определять из выражения:

$$Z_{\text{а}} = \sqrt{\frac{R_0}{G_0}} = \sqrt{R_0 R_{\text{из}}}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где

R_0 – сопротивление цепи постоянному току, Ом/км;

G_0 – проводимость изоляции по постоянному току, См/км;

$R_{\text{из}}$ – сопротивление изоляции, Ом·км.

В диапазоне низких частот ($f < 800 \text{ Гц}$) при соотношении параметров $\frac{R}{\omega L} > 5$, волновое сопротивление равно:

$$Z_{\text{а}} = \sqrt{\frac{R + \omega L}{2\omega C}} - i \sqrt{\frac{R - \omega L}{2\omega C}}, \text{ Ом}. \quad (2)$$

В тональном диапазоне частот ($f = 800 \text{ Гц}$) при соотношении параметров $\frac{R}{\omega L} > 50$, величину волнового сопротивления можно найти по формуле:

$$Z_a = \sqrt{\frac{R}{\omega C}} \cdot e^{-i45^\circ}, \text{ Ом} \quad (3)$$

В области высоких частот (при $f > 40 \text{ кГц}$) волновое сопротивление определяется из выражения (1.11), а на промежуточных частотах – по полной формуле:

$$Z_a = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}, \text{ Ом} \quad (4)$$

При решении задач с комплексными числами следует помнить, что комплексным числом z называется выражение:

$$z = a + ib \quad (5)$$

где a и b – действительные числа; i – так называемая мнимая единица.

Величина a называется действительной или вещественной частью ($a = \text{Re}z$), b – мнимой частью числа z ($b = \text{Im}z$).

Всякое комплексное число $z = a + ib$ можно изобразить на плоскости в виде точки $A(a, b)$ с координатами a и b (рис.1).

Тогда:

$$a = r \cos \varphi, \quad (6)$$

$$b = r \sin \varphi, \quad (7)$$

$$z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi) = re^{i\varphi}. \quad (8)$$

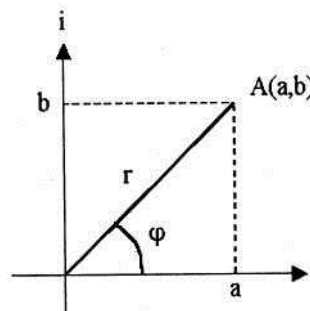


Рис. 1. Изображение комплексного числа

Выражение $z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ называется тригонометрической формой записи комплексного числа $z = a + ib$; r – называется модулем комплексного числа z , φ – аргументом комплексного числа Z ; они обозначаются $r = |z|$, $\varphi = \arg z$.

Через a и b эти величины выражаются как:

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (9)$$

$$\varphi = \arctg \frac{b}{a}, \quad (10)$$

Причем аргумент комплексного числа φ записывается в виде $-(\varphi + 2\pi k)$, где k – целое число или 0.

Найти значение $\arctg x$ можно путем разложения в ряды:

$$\arctg x = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{x} + \frac{1}{3x^3} - \frac{1}{5x^5} + \frac{1}{7x^7} - \dots; [x > 1], \quad (11)$$

$$\arctg x = -\frac{\pi}{2} - \frac{1}{x} + \frac{1}{3x^3} - \frac{1}{5x^5} + \frac{1}{7x^7} - \dots; [x < -1], \quad (12)$$

$$\operatorname{arctg} x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \dots; [x^2 < 1], \quad (13)$$

Для раскрытия квадратного корня с комплексными числами можно воспользоваться выражениями:

$$\sqrt{a+ib} = \sqrt{re^{i\varphi}} = \pm \sqrt{r} e^{i\frac{\varphi}{2}} = \pm \sqrt{r} \left(\cos \frac{\varphi}{2} + i \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \right). \quad (14)$$

Для показательных функций будут справедливы следующие выражения:

$$e^{a+ib} = e^a (\cos b + i \sin b); \quad (15)$$

$$e^{ib} = \cos b + i \sin b; \quad (16)$$

$$e^{-ib} = \cos b - i \sin b. \quad (17)$$

Расчет коэффициента распространения электромагнитной энергии

Электромагнитная энергия, распространяясь вдоль линии связи, уменьшается по величине и изменяется по фазе от начала к концу линии. Коэффициент затухания α и коэффициент фазы β в общем виде определяются по формуле расчета коэффициента распространения. Коэффициент распространения γ является комплексной величиной и может быть определен суммой действительной и мнимой ее частей:

$$\gamma = \sqrt{(R+i\omega L) \cdot (G+i\omega C)} = \alpha + i\beta, \quad (18)$$

где

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

R – сопротивление цепи, Ом/км;

G - проводимость изоляции цепи, См/км;

L - индуктивность цепи. Гн/км;

C – емкость цепи, Ф/км.

При известных значениях тока или напряжения в начале и в конце линии коэффициент распространения можно представить в следующем виде:

$$\frac{U_0}{U_l} = \frac{I_0}{I_l} = e^{(\alpha+i\beta)l} = e^{\alpha l} e^{i\beta l}, \quad (19)$$

где

α - коэффициент затухания;

β - коэффициент фазы.

Действительная часть αl коэффициента распространения показывает уменьшение электромагнитной энергии в конце линии по сравнению с началом и называется собственным затуханием линии:

$$\frac{U_0}{U_l} = \frac{I_0}{I_l} = e^{\alpha l}. \quad (20)$$

Мнимая часть выражения βl - показывает изменение фазы (угла) при распространении энергии по цепи и называется собственным сдвигом фазы линии:

$$\beta l = \varphi_{OU} - \varphi_{IU} = \varphi_{OI} - \varphi_{II}. \quad (21)$$

Расчет коэффициента затухания

Затухание принято оценивать в дицибелах (белах) или неперах. Затухание в 1 Нп – это затухание с такой симметричной цепи, в которой ток

или напряжение в начале линии больше по абсолютной величине, чем ток или напряжение в конце в 2,718 раза:

$$\frac{U_0}{U_l} = \frac{I_0}{I_l} = e^1 = 2,718.$$

Затухание в 1 бел (Б) соответствует снижению мощности по абсолютной величине в 10 раз:

$$\alpha = \lg\left(\frac{P_0}{P_l}\right), \text{Б}, \quad (22)$$

или:

$$\frac{P_0}{P_l} = 10^\alpha = 10^1 = 10.$$

Децибел является одной десятой бела:

$$\alpha = 10 \lg\left(\frac{P_0}{P_l}\right), \text{дБ}. \quad (23)$$

или:

$$\frac{P_0}{P_l} = 10^{0,1\alpha} = 10^{0,1} = 1,26.$$

То есть, децибел соответствует снижению мощности в 1,26 раза. Для взаимного перевода непер в децибелы необходимо воспользоваться следующими значениями:

$$1\text{дБ} = 8,686\text{дБ}, \quad (24)$$

$$1\text{дБ} = 0,115\text{дБ} \quad (25)$$

Для определения затухания в определенных частотных областях можно пользоваться упрощенными формулами. При постоянном токе:

$$\alpha = \sqrt{R_0 G_0}, \text{ Нп/км} \quad (26)$$

где

R_0 - сопротивление цепи постоянному току, Ом/км;

G_0 - проводимость изоляции по постоянному току, См/км.

В диапазоне низких частот ($f < 800\text{Гц}$) при соотношении параметров $\frac{R}{\omega L} > 5$:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega C}{2}(R - \omega L)}, \text{ Нп/км}. \quad (27)$$

В тональном диапазоне частот ($f = 800\text{Гц}$) при соотношении параметров $\frac{R}{\omega L} > 50$:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}}, \text{ Нп/км}. \quad (28)$$

В областях высоких частот (при $f > 40\text{кГц}$), когда $\frac{\omega L}{R} > 5$ и $\frac{\omega C}{G} > 5$, следует пользоваться формулой (1.12). В этой формуле первый член учитывает потери в металле, а второй – потери в диэлектрике.

Для нахождения затухания на промежуточных частотах следует воспользоваться полным уравнением коэффициента затухания:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2) \cdot (G^2 + \omega^2 C^2)} - (\omega^2 LC - RG) \right]}, \text{ Нп/км.} \quad (29)$$

Коэффициент затухания кабельной цепи при температуре, отличной от 20⁰С, можно найти из формулы:

$$\alpha_t = \alpha_{20} [1 + \alpha_\alpha (t - 20)], \text{ дБ/км,} \quad (30)$$

где

α_{20} - коэффициент затухания при температуре 20⁰С, дБ/км;

α_α - температурный коэффициент затухания, $\frac{1}{^\circ\text{C}}$,

Таблица 1

Для кабелей МКС - 4×4

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

Расчет коэффициента фазы

Коэффициент фазы определяет угол сдвига между током (или напряжением) на протяжении одного километра. Для определения коэффициента фазы в определенных частотных областях также можно пользоваться упрощенными формулами. При постоянном токе:

$$\beta = 0 \quad (30)$$

В диапазоне низких частот ($f < 800 \text{ Гц}$) при соотношении параметров $\frac{R}{\omega L} > 5$:

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega C}{2}} (R + \omega L), \text{ рад/км.} \quad (32)$$

В тональном диапазоне частот ($f = 800 \text{ Гц}$) при соотношении параметров $\frac{R}{\omega L} > 50$:

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}}, \text{ рад/км.} \quad (33)$$

В областях высоких частот (при $f > 40 \text{ кГц}$), когда $\frac{\omega L}{R} > 5$ и $\frac{\omega C}{G} > 5$:

$$\beta = \omega \sqrt{LC}, \text{ рад/км.} \quad (34)$$

Для определения коэффициента фазы на промежуточных частотах следует решить полное уравнение:

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2) \cdot (G^2 + \omega^2 C^2)} + (\omega^2 LC - RG) \right]}, \text{ Нп/км.} \quad (35)$$

Если затухание цепи определяет дальность связи, то коэффициент фазы обуславливает скорость распространения энергии по линии.

Расчет скорости распространения энергии

Скорость распространения электромагнитной энергии является функцией частоты и фазовой постоянной, которая в свою очередь зависит от первичных параметров линии. В общем виде она определяется по формуле:

$$v = \frac{\alpha}{\beta}, \text{ км/с.} \quad (36)$$

Для определения скорости в определенных частотных областях следует пользоваться упрощенными формулами. в спектре низких частот ($f < 800 \text{ Гц}$):

$$v = \sqrt{\frac{2\omega}{RC}}, \text{ км/с.} \quad (37)$$

В области высоких частот (при $f > 40 \text{ кГц}$), когда скорость не зависит от частоты и определяется только параметрами кабеля:

$$v = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \text{ км/с.} \quad (38)$$

Для расчета скорости движения электромагнитной энергии постоянного тока можно использовать формулу:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC} \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{LG}{RC}} + \sqrt{\frac{RC}{LG}} \right) \right]}, \text{ км/с.} \quad (39)$$

Скорость прохождения постоянного тока по линии составляет примерно 10000 км/с , а токи высоких частот движутся со скоростью до 200000 км/с , приближаясь к скорости света ($c = 300000 \text{ км/с}$).

Варианты задач

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

Задача 2. Определить коэффициент затухания симметричной цепи в кабеле МСКГ 4×4 , если кабель работает с системой передачи Л-300. показать, во сколько раз потери в металле больше или меньше потерь в диэлектрике. Расчеты проводить на верхней и нижней частоте системы передачи.

Задача 3. Определить, на сколько отличаются коэффициенты фазы симметричных цепей МСКГ 4×4 и МКГ 4×4 , если кабели работают с системой передачи ИКМ-30. Расчеты проводить на верхней частоте системы передачи.

Задача 4. Определить, на сколько быстрее движется высокочастотная составляющая сигнала от низкочастотной составляющей по симметричной цепи в кабеле МСКГ 4×4 , если кабель работает с системой передачи К-60.

Задача 5. Определить, минимальное и максимальное значение волнового сопротивления электромагнитной волне, проходящей по симметричной паре кабеля ТПП $10 \times 2 \times 0,5$.

Задача 6. Определить значение волнового сопротивления электромагнитной волне, проходящей по симметричной паре кабеля МКГ 1×4. Расчеты проводить для постоянного тока.

Задача 7. Определить коэффициент затухания симметричной цепи в кабеле МКГ 4×4, если кабель работает с системой передачи К-60. Расчеты проводить на нижней частоте передачи.

Задача 8. Определить, на сколько изменится коэффициент затухания симметричной цепи в кабеле МКСГ 4×4, если в первом случае кабель находится в среде с температурой $t=+20^{\circ}\text{C}$, во втором случае – в среде с температурой $t=-30^{\circ}\text{C}$. По симметричной цепи работает система передачи К-60. Расчеты проводить на верхней и нижней частоте передаваемых сигналов.

Задача 9. Определить коэффициент фазы симметричной цепи в кабеле МКГ 4×4, если кабель работает с системой передачи К-60. Расчеты проводить на нижней частоте передачи.

Задача 10. Определить, на сколько отличается скорость движения низкочастотной составляющей сигнала по симметричной цепи в кабеле МКСГ 4×4 от скорости движения низкочастотной составляющей сигнала по симметричной цепи в кабеле МКГ 4×4, если кабели работают с системой передачи К-60.

Список литературы

1. Гроднев И.И., Верник С.М. Линии связи. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Барон Д.А., Гроднев И.И. и др. Справочник. Строительство кабельных сооружений связи. – М.: Радио и связь, 1988.
3. Ионов А.Д., Попов Б.В. Линии связи: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1988.
4. Цым А.Ю., Камалыгин В.И. Междугородные симметричные кабели для цифровых систем передачи. – М.: Радио и связь, 1984.
5. Андреев В.А., Портнов Э.Л., Кочановский Л.Н. Направляющие системы электросвязи. Том1. Теория передачи и влияния. – М.: Горячая линия – Телеком. 2009.
6. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Учебное пособие. - М.: Горячая линия – Телеком. 2004.

Контрольное задание №4

Расчет взаимного влияния в симметричных цепях воздушных и кабельных линий связи

Методические указания

Воздушные линии

В симметричных цепях, как в воздушных, так и в кабельных линиях, переходное влияние обусловлено электрическими и магнитными связями между цепями, которые выражаются результирующими электромагнитными связями на ближнем конце N_{12} и дальнем конце F_{12} :

$$N_{12} = K_{12}Z_{\dot{a}} + \frac{M_{12}}{Z_{\dot{a}}} = (g_{12} + i\omega k_{12})Z_{\dot{a}} + \frac{(r_{12} + i\omega m_{12})}{Z_{\dot{a}}}, 1/\text{км} \quad (1)$$

$$F_{12} = K_{12}Z_{\dot{a}} - \frac{M_{12}}{Z_{\dot{a}}} = (g_{12} + i\omega k_{12})Z_{\dot{a}} - \frac{(r_{12} + i\omega m_{12})}{Z_{\dot{a}}}, 1/\text{км} \quad (2)$$

где

K_{12} - электрическая связь, См/км;

M_{12} - магнитная связь, Ом/км;

$Z_{\dot{a}}$ - волновое сопротивление симметричной цепи, Ом;

g_{12} - активная составляющая электрической связи, См/км;

k_{12} - емкостная связь, Ф/км;

r_{12} - активная составляющая магнитной связи, Ом/км;

m_{12} - индуктивная связь, Гн/км;

ω - круговая частота ($\omega = 2\pi f$).

Для воздушных линий связи (ВЛС) формулы переходного затухания (рис.1) принимают вид:

$$A_0 = 20 \lg \left| \frac{4\gamma}{N_{12}1 - e^{-2\gamma l}} \right|, \text{ дБ} \quad (3)$$

$$A_l = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12}l} \right|, \text{ дБ} \quad (4)$$

$$A_3 = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12}l} \right|, \text{ дБ} \quad (5)$$

где

$\gamma = \alpha + i\beta$ - коэффициент распространения;

α - коэффициент затухания;

β - коэффициент фазы.

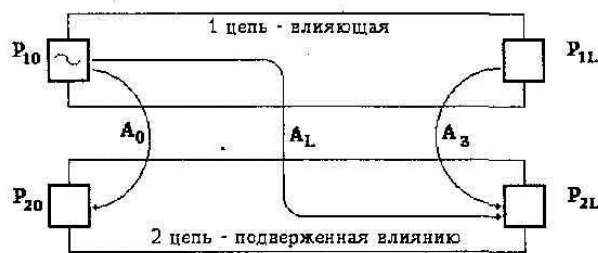


Рис. 1. Влияние между цепями

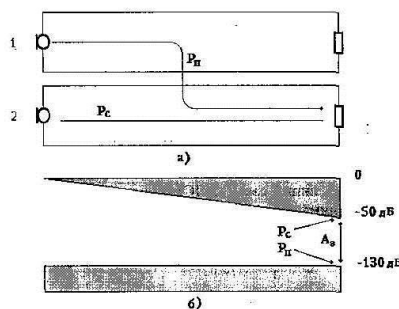


Рис.2. К определению защищенности цепей:
а) схема влияния; б) уровни в цепи 2

В воздушных линиях связи провода расположены на больших расстояниях друг от друга, и у них нет изоляционных покрытий. В этом случае в первичных параметрах влияния можно пренебречь активными составляющими связей (g и r), так как асимметрия потерь мало сказывается на вихревые токи ($r=0$) и невелика асимметрия потерь в диэлектрике ($g=0$). Влияние учитывается лишь реактивными связями $K_{12} = (i\omega k_{12})$ и $M_{12} = (i\omega m_{12})$. Значения первичных параметров влияния k_{12} и m_{12} в воздушных линиях связи зависят в основном от взаимного расположения влияющих и подверженных влиянию цепей. Они могут быть рассчитаны по следующим выражениям:

$$k_{12} = 13900 \frac{\left[\ln \frac{a_{13}a_{24}}{a_{14}a_{23}} \right] \cdot 10^{-12}}{\left[\ln \frac{a}{r} \right]^2}, \text{ Ф/км}; \quad (6)$$

$$m_{12} = 200 \left[\ln \frac{a_{13}a_{24}}{a_{14}a_{23}} \right] \cdot 10^{-6}, \text{ Гн/км}, \quad (7)$$

где

a – расстояние между проводами цепи;

r – радиус провода;

a_{13} – расстояние между первым проводом влияющей цепи и первым проводом цепи, подверженной влиянию (рис.3);

a_{24} – расстояние между вторым проводом влияющей цепи и вторым проводом цепи, подверженной влиянию;

a_{23} – расстояние между вторым проводом влияющей цепи и первым проводом цепи, подверженной влиянию;

a_{14} – расстояние между первым проводом влияющей цепи и вторым проводом цепи, подверженной влиянию

Электрические и магнитные связи связаны соотношением $\frac{m_{12}}{k_{12}} = Z_B^2$.

Для медных и биметаллических цепей (диаметр проводов 4 мм, расстояние между проводами 20 см) воздушных линий $Z_B \approx 550$ Ом, для сталеалюминиевых цепей (диаметр проводов 5,4 мм, расстояние между проводами 20 см) $Z_B \approx 500$ Ом, для стальных цепей (диаметр проводов 4 мм, расстояние между проводами 20 см) $Z_B \approx 1100$ Ом.

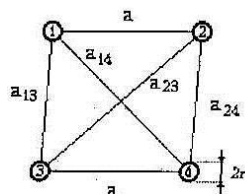


Рис.3. К расчету электромагнитных связей в воздушных линиях связи

В результате того, что в воздушных линиях не учитываются активные составляющие связей, результирующие электромагнитные связи на ближнем и дальнем конце принимают значения:

$$N_{12} = iw(k_{12}Z_{\epsilon} + \frac{m_{12}}{Z_{\epsilon}}), 1/\text{км}; \quad (8)$$

$$F_{12} = iw(k_{12}Z_{\epsilon} - \frac{m_{12}}{Z_{\epsilon}}), 1/\text{км}. \quad (9)$$

При работе систем передачи В-12-2 и В-3-3 по воздушным линиям с медными или биметаллическими цепями, расстояние между усилительными пунктами составляет 250 км, а для систем передачи В-2-2 и В-3-3, работающих по ВЛС со стальными цепями, расстояние между усилительными пунктами составляет от 30 до 40 км.

Для снижения влияния между цепями необходимо уменьшить параметр:

$$\ln \frac{a_{13}a_{24}}{a_{14}a_{23}} \quad (10)$$

Защищенность на усилительный участок воздушной линии определяется выражением:

$$A_3^{yy} = 50,4 + 10 \lg N, \text{ дБ}, \quad (11)$$

где N – число усилительных участков.

Переходное затухание на ближнем конце усилительного участка будет равно:

$$A_o^{yy} = 50,4 + 10 \lg N + 20 \lg \sqrt{2}p + 3,47, \text{ дБ}, \quad (12)$$

где p – коэффициент отражения (для высокочастотных систем передачи p=0,1).

Переходное затухание на дальнем конце усилительного участка будет равно:

$$A_l^{yy} = 50,4 + 10 \lg N + \alpha \ell, \text{ дБ}, \quad (13)$$

где ℓ – длина усилительного участка.

При неизменной длине усилительного участка среднее значение переходного затухания на ближнем конце в зависимости от частоты плавно уменьшается и на высоких частотах приближается к асимптотическому значению:

$$A_o^{yy} \approx 20 \lg \left| \frac{2C}{k_{12}} \right|, \text{ дБ}, \quad (14)$$

где C – емкость цепи, Ф/км; k_{12} – емкостная связь, Ф/км.

Влияние от отражений на дальнем конце в воздушных линиях связи определяется в основном отражением от концов линий, значение которого оценивается переходным затуханием от отражений:

$$A_l^{omp} = A_o - 20 \lg |\sqrt{2} \cdot p|, \text{ дБ}, \quad (15)$$

Переходное затухание на ближнем конце между нескрещенными цепями определяется выражением:

$$A_o = 20 \lg \left| \frac{4Z_{\epsilon}\omega C}{N_{12}} \right|, \text{ дБ}, \quad (16)$$

где Z_{ϵ} – волновое сопротивление цепи; C – емкость цепи.

Эффективность скрещивания на ближний конец (от скрещивания цепей с шагом $\lambda/16$, $T < 1$) определяется выражением:

$$A_n = 20 \lg \left| \frac{1}{\text{th} \gamma n S} \right| = 20 \lg \left| \frac{1}{T} \right|, \text{ дБ}, \quad (17)$$

где

λ – длина волны;

γ – коэффициент распространения электромагнитной волны;

S – шаг скрещивания;

n – число секций скрещивания.

Симметричные кабели

Для скрученных кабельных симметричных цепей принимается геометрический закон сложения влияний в отдельных строительных длинах кабеля. В этом случае формулы переходного затухания (рис. 1.6) принимают вид:

$$A_0 = 20 \lg \left| \frac{4\sqrt{\alpha}}{N_{12}\sqrt{1-e^{-4\alpha\ell}}} \right|, \text{ дБ}, \quad (18)$$

$$A_\ell = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12}\sqrt{\ell}} \right| + \alpha\ell, \text{ дБ}, \quad (19)$$

$$A_s = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12}\sqrt{\ell}} \right|, \text{ дБ}, \quad (20)$$

где α – коэффициент затухания цепи, дБ/км; ℓ – длина линии, км.

В области низких частот преобладает емкостная связь, а другими составляющими взаимного влияния можно пренебречь. В области высоких частот учитываются все четыре составляющие связей. При этом количественное соотношение активных и реактивных составляющих связей в среднем равно:

$$(g/\omega k) = 10 - 15\%, \quad (21)$$

$$(r/\omega m) = 20 - 40\%. \quad (22)$$

При расчетах принимают:

$$(m_{12}/k_{12}) \approx Z_s^2. \quad (23)$$

При этом:

$$k_{12} = k_1/4, \quad (24)$$

где k_1 – емкостная связь между основными цепями четверки; ее значение задается в технических условиях на строительную длину кабеля.

Перерасчет на нестандартную строительную длину осуществляется перемножением значения k_1 для стандартной длины на коэффициент $(\ell_{н.ст}/\ell_{ст})$, где $\ell_{н.ст}$ – нестандартная длина, м, $\ell_{ст}$ – стандартная длина, м.

Для строительных длин определение переходных затуханий и защищенности производится по формулам:

$$A_0^{c\partial} = 20 \lg \left| \frac{2}{N_{12}} \right|, \text{ дБ}; \quad (25)$$

$$A_s^{c\partial} = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12}} \right|, \text{ дБ}; \quad (26)$$

$$A_\ell^{c\partial} = 20 \lg \left| \frac{2}{F_{12}} \right| + \alpha\ell_{c\partial}, \text{ дБ}, \quad (27)$$

где α – коэффициент затухания цепи, дБ/км.

Параметры влияния на усилительных участках связаны с параметрами влияния на строительных длинах следующими соотношениями:

$$A_0^{yy} = A_0^{c\partial} + 20 \lg \sqrt{\frac{4\alpha\ell_{c\partial}}{1-e^{-4\alpha\ell_{c\partial}n}}}, \text{ дБ}; \quad (28)$$

$$A_s^{yy} = A_s^{c\partial} + 20 \lg \sqrt{n}, \text{ дБ}; \quad (29)$$

$$A_{\ell}^{yy} = A_3^{cd} + \alpha(n-1)\ell_{cd}, \text{ дБ}, \quad (30)$$

где

n – число строительных длин;

ℓ_{cd} – строительная длина кабеля, км;

α – коэффициент затухания цепи, дБ/км.

В симметричных кабельных цепях переходное затухание и защищенность снижаются с ростом частоты и длины линии. Поэтому расчет взаимных влияний в аналоговом режиме следует проводить на частотах, одной из которых является наивысшая частота используемого диапазона системы передачи, а в цифровом режиме – на частотах, одной из которых является полутактовая частота системы передачи.

Влияние через третью цепь определяется выражением:

$$A_{\ell}^{3-я} = 2A_0 - 10\lg[2(\alpha_1 + \alpha_3)\ell], \text{ дБ}, \quad (31)$$

где

α_1 – километрическое затухание основной цепи, дБ/км;

α_3 – километрическое затухание третьей цепи, дБ/км;

ℓ – длина усилительного участка.

Рассчитанные значения переходного затухания на наивысшей частоте в аналоговом режиме необходимо сравнить с нормами для строительной длины усилительного участка.

Таблица 1.11.

Нормы переходного затухания для различных аналоговых систем передачи на усилительный участок

Тип линии	Двухпроводная	Четырехпроводная
НЧ симметричные кабели A_0 , дБ A_{ℓ} , дБ	$60,8 + \alpha\ell$ $60,8 + \alpha\ell$	$65,1 + \alpha\ell$ $65,1 + \alpha\ell$
ВЧ симметричные кабели A_0 , дБ A_{ℓ} , дБ	60,8 73,8 для 90% 71,0 для 100%	$73,8 + \alpha\ell$ 73,8 для 90% 71,0 для 100%

Таблица 1.12.

Нормы переходного затухания для цифровых систем передачи на регенерационный участок

Система передачи	Длина РГУ, км	$A_{\ell_{РГУ}}$ (0,25МГц), дБ при $P_{\ell_{РГУ}}$ ошибки			$A_{\ell_{cd}}$ (0,25МГц), дБ	$A_{\ell_{cd}}$ (ω), для К-60п, дБ
		10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}		
ИКМ-30	10	35,1	35,5	36,0	54,6	68
ИКМ-120	5	51,5	51,9	52,3	68,0	
ИКМ-480	2,5	67,7	68,1	68,0	81,2	
ИКМ-1920	1,2	81,3	81,7	82,2	91,5	

Требуемое значение переходного затухания между трактами ЦСП на длине РГУ двухкабельной магистрали [4] определяется из выражения:

$$A_{\ell}(\omega_{nm}) \geq 26 + 10 \lg(n - 1), \text{ дБ}, \quad (32)$$

где n – число трактов в кабеле; ω_{nm} – значение полутаковой частоты системы передачи.

Таблица 1.13.

Нормы для цифровых систем передачи на регенерационный участок при вероятности ошибки 10^{-11}

Система передачи	Скорость передачи, Кбит/с	Тактовая частота, МГц	Полутаковая частота, МГц	A_0 , дБ	A_3 , дБ	$\ell_{уч}$, км
ПЦСП	2048	2,048	1,024	58	62,7	5
ВЦСП	8448	8,448	4,224	46	52,9	2,5
ТЦСП	34368	34,368	17,184	38	45	1,5
ЧЦСП	139264	139,264	69,632	-	-	-

Норма защищенности цепей, оборудованных аппаратурой К-60п, от влияния цепей, оборудованных аппаратурой ИКМ-120, равна 52 дБ на регенерационный участок.

В существующих справочниках дана норма защищенности цепей строительных длин кабеля $A_{3\text{зн}}^{cd}$ для частоты 0,25 МГц. Требуемые нормы для другой частоты определяются выражениями:

$$A_3(f_x; \ell_x) = A_3(f_1; \ell_1) - 40 \lg \frac{f_x}{f_1} - 10 \lg \frac{\ell_x}{\ell_1}, \text{ дБ}. \quad (33)$$

Для межчетверочных комбинаций:

$$A_3(f_x; \ell_x) = A_3(f_1; \ell_1) - 20 \lg \frac{f_x}{f_1} - 10 \lg \frac{\ell_x}{\ell_1}, \text{ дБ}. \quad (34)$$

где

$A_3(f_x; \ell_x)$ – определяемая защищенность на требуемой частоте f_x и необходимой длине участка ℓ_x ;

$A_3(f_1; \ell_1)$ – известное значение защищенность на известной частоте f_1 и известной длине ℓ_1 .

Для двухкабельной системы при наличии 6 трактов К-60п и 2 трактов ИКМ-120 частотная зависимость защищенность аппроксимируется выражением [4]:

$$A_{3\ell}(f) = \frac{9468}{f+230} + 44,6 - 10 \lg 6, \text{ дБ}, \quad (35)$$

а минимальное переходное затухание на ближнем конце выражением [4]:

$$A_0 = 60,8 - 10 \lg 6 = 53 \text{ дБ}. \quad (36)$$

Варианты задач

Воздушные линии

Задача 1. Определить электромагнитные связи N_{12} и F_{12} первой и второй цепи на воздушной линии с профилем №3. Диаметр медных проводов $\varnothing=4$ мм. По воздушной линии работает система передач В-12-2. Расчеты проводить на верхней частоте системы передачи.

Задача 2. Определить, как изменяются электромагнитные связи между первой и второй цепью на ближнем и дальнем конце N_{12} и F_{12}

воздушной линии при перемещении второй цепи на место четвертой цепи на траверсе профиля №3. Диаметр медных проводов $\varnothing=4$ мм. По воздушной линии работает система передач В-12-2. Расчеты проводить на верхней частоте системы передачи.

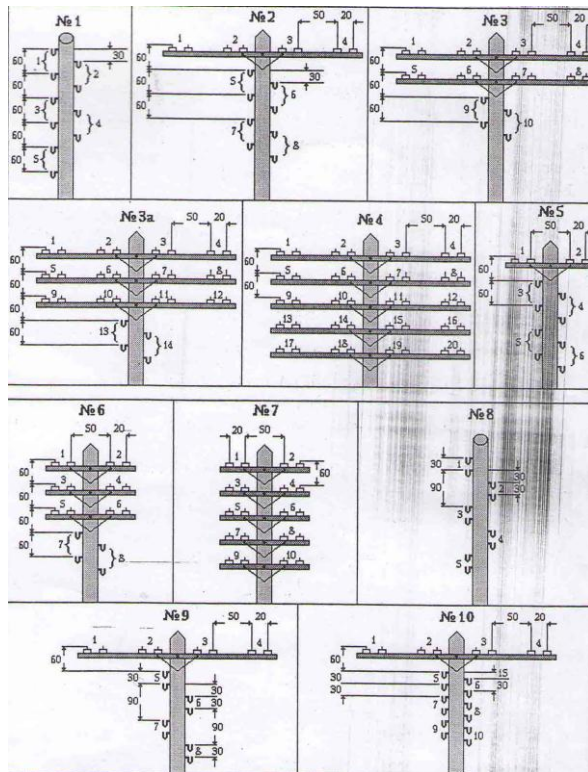


Рис. 4. типовые профили опор линий связи

Симметричные кабели

Задача 3. Рассчитать электромагнитные связи между цепями четверки симметричного кабеля типа МКСАШп 4х4. По кабелю работает система передачи К-60. Расчеты проводить на верхней частоте системы передачи.

Задача 4. Определить электромагнитную связь на ближнем и дальнем концах цепей четверки симметричного кабеля типа МКСАШп 4х4 на полутактовой частоте системы передачи ИКМ-30.

Задача 5. Определить в цепях кабеля типа МКСАШп 4х4 переходное затухание на ближнем конце и защищенность на полутактовой частоте системы передачи ИКМ-120.

Задача 5. Определить в цепях кабеля типа МКСАШп 4х4 переходное затухание на ближнем конце и защищенность на полутактовой частоте системы передачи ИКМ-120.

Задача 6. Определить на регенерационном участке длиной 5 км переходное затухание в цепях кабеля типа МКСАШп 4х4. По кабелю работает система передачи ИКМ-120. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

Задача 7. Для строительной длины кабеля МКС 4х4 внутри четверки рассчитать защищенность на частоте 2 МГц.

Задача 8. Определить электромагнитные связи N_{12} и F_{12} первой и восьмой цепи на воздушной линии с профилем №4. Диаметр стальных проводов $\varnothing=4$ мм. По воздушной линии работает система передач В-3-3. Расчеты проводить на верхней частоте системы передачи.

Задача 9. Определить, как изменяются электромагнитные связи между первой и второй цепью на ближнем и дальнем конце N_{12} и F_{12} воздушной линии при перемещении второй цепи на место восемнадцатой цепи на траверсе профиля №4. Диаметр стальных проводов $\varnothing=4$ мм. По воздушной линии работает система передач В-3-3. Расчеты проводить на верхней частоте системы передачи.

Задача 10. Определить на усилительном участке защищенность первой и четвертой цепи ВЛС профиля №3. По цепям работает система передачи В-12. Диаметр стальных проводов $\varnothing=4$ мм. Расчеты проводить на верхней частоте системы передачи.

Список литературы

1. Гроднев И.И., Верник С.М. Линии связи. – М.: Радио и связь, 1988.
2. Барон Д.А., Гроднев И.И. и др. Справочник. Строительство кабельных сооружений связи. – М.: Радио и связь, 1988.
3. Ионов А.Д., Попов Б.В. Линии связи: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1988.
4. Цым А.Ю., Камалыгин В.И. Междугородные симметричные кабели для цифровых систем передачи. – М.: Радио и связь, 1984.
5. Андреев В.А., Портнов Э.Л., Кочановский Л.Н. Направляющие системы электросвязи. Том1. Теория передачи и влияния. – М.: Горячая линия – Телеком. 2009.
6. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Учебное пособие. - М.: Горячая линия – Телеком. 2004.

Контрольное задание №5

Расчет первичных параметров коаксиальных цепей

Методические указания

Расчет сопротивления

Коаксиальные кабели обычно используются в диапазоне частот свыше 60кГц, при этом расчет первичных параметров на этих частотах можно производить по упрощенным формулам. Активное сопротивление коаксиальной пары состоит из сопротивления внутреннего проводника R_a и внешнего (полого) проводника R_6 и рассчитывается из выражения (2.4), где k -коэффициент вихревых токов определяется из выражения $k=\sqrt{\omega\mu_a\sigma}$, где σ - проводимость металла (табл.2.1) $\mu_a = \mu_o\mu_r$ - абсолютная магнитная проницаемость; $\mu_o=4\pi\cdot 10^{-4}$ Гн/м- магнитная проницаемость вакуума μ_r - относительная магнитная проницаемость ; для проводника (для медных проводников $\mu_r=1$, для стальных=130, для свинца=1). Значения k даны в

табл.2.1.Значения внутреннего и внешнего диаметра d и D подставляются в мм ,частота f в Гц. Для стандартных габаритных соотношений медных проводников коаксиальной пары ($D/d=3,6$) около 80% сопротивления приходится на внутренний провод и 20%-на внешний.

Таблица 2.1.

Материал проводника	$k = \sqrt{\omega\mu_a\sigma}, \text{мм}^{-1}$	kr	$\sigma, \text{м}/(\text{Ом}\cdot\text{мм}^2)$
Медь	$0.021\sqrt{f}$	$0.0105d\sqrt{f}$	57.00
Алюминий	$0.0164\sqrt{f}$	$0.082d\sqrt{f}$	34.36
Сталь	$0.075\sqrt{f}$	$0.0375d\sqrt{f}$	7.23
Величина f подставляется в Гц			

Если внешний и внутренний проводники медные, то расчет следует проводить по формуле(2.5).

Для коаксиальной пары из алюминиевых проводников формула (2.4) преобразуется в выражение:

$$R = 0,108\sqrt{f}\left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D}\right), \text{Ом/м.} \quad (2.21)$$

Если внутренний проводник коаксиальной пары медный, а внешний-алюминиевый, то активное сопротивление определяется из выражения:

$$R = \sqrt{f}\left(\frac{0.0835}{d} + \frac{0.108}{D}\right), \text{Ом/м.} \quad (2.22)$$

Электрическое сопротивление внутреннего проводника коаксиальной пары постоянному току определяется из выражения (2.6).Значение удельного сопротивления для различных металлов определяется из табл.2.2.

Таблица 2.2

Наименование металла	Удельное сопротивление ρ при $t=20^\circ\text{C}, \text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$
Медь	0.0175
Алюминий	0.0282
Сталь	0.098
Цинк	0.062

Электрическое сопротивление внешнего проводника коаксиальной пары постоянному току определяется из выражения (2.7) как параллельное подключение сопротивления внешнего медного проводника R_M и сопротивления экрана R_Σ .

Значение сопротивления постоянному току внешнего медного проводника определяется из выражения:

$$R_M = \frac{1000\rho_M}{\pi(D+t)}, \text{Ом/км} \quad (2.23)$$

где

ρ_M -удельное сопротивление, $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ (табл.2.2);

t -толщина ленты внешнего медного проводника, мм,

D -внутренний диаметр внешнего проводника, мм.

Значение сопротивления постоянному току экрана коаксиальной пары определяется из выражения:

$$R_{\Sigma} = \frac{1000\rho_{\Sigma}}{\pi(D+t+\Delta)\Delta n}, \text{ Ом/км} \quad (2.24)$$

где

ρ_{Σ} - удельное сопротивление металла экранирующих лент, Ом*мм²/м (табл.2.2)

Δ - толщина экранирующих лент, мм;

n - число экранирующих лент.

При расчете активного сопротивления коаксиальной пары на частотах <60кГц расчеты следует производить по полным формулам. Сопротивление внутреннего проводника R_a в этом случае определяется из выражения:

$$R_a = R_0[1 + F(kr)], \text{ Ом/км} \quad (2.25)$$

где

R_0 - электрическое сопротивление внутреннего проводника коаксиальной пары постоянному току;

$F(kr)$ - специальная функция, полученная с использованием видоизмененных функций Бесселя (табл.2.3).

Как видно из выражения для определения сопротивления цепи, необходимо сначала найти специальную функцию Бесселя $F(kr)$. Ее значение представлено в табл.2.3. Аргументом этой функции является произведение коэффициента вихревых токов (табл.2.1) на радиус голого проводника kr . Значение k даны в табл.2.1

Таблица 2.3

Kr	F(kr)	G(kr)	H(kr)	H(kr)
0	0	$\frac{(kr)^4}{64}$	0.0417	1
0,5	0,000326	0,000975	0,042	57,00
1,0	0,00519	0,01519	0,053	0,997
1,5	0,0258	0,0691	0,092	0,987
2,0	0,0782	0,1724	0,169	0,961
2,5	0,1756	0,295	0,263	0,913
3,0	0,318	0,405	0,348	0,845
3,5	0,492	0,499	0,416	0,766
4,0	0,678	0,584	0,466	0,686
4,5	0,862	0,669	0,503	0,616
5,0	1,042	0,755	0,530	0,556
7,0	1,743	1,109	0,596	0,400
10,0	2,799	1,641	0,643	0,282
>10,0	$\frac{\sqrt{2kr}-3}{4}$	$\frac{\sqrt{2kr}-1}{8}$	$\frac{1}{4 \left[\frac{3\sqrt{2kr}-5}{\sqrt{2kr}-1} - \frac{2\sqrt{2}}{kr} \right]}$	$\frac{2\sqrt{2}}{kr}$

Активное сопротивление внешнего проводника R_b коаксиальной пары на частотах <60кГц определяется по формуле:

$$R_b = \frac{10^3}{2\pi r_b \sigma} \left[\frac{k}{\sqrt{2}} \frac{\operatorname{sh} u + \sin u}{\operatorname{ch} u + \cos u} - \frac{4r_b + t}{8(r_b + t)r_b} \right], \quad \text{Ом/км} \quad (2.26)$$

где

t - толщина внешнего проводника, мм

r_b -внутренний радиус внешнего проводника, мм

σ -проводимость металла(табл.2.1)

k -коэффициент вихревых токов,

$u = \sqrt{2} kt$

Найти значения гиперболического синуса и косинуса можно путем разложения в ряды:

$$\operatorname{sh} x = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \frac{x^7}{7!} + \dots \quad [x^2 < \infty]; \quad (2.27)$$

$$\operatorname{ch} x = x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \frac{x^6}{6!} + \dots [x^2 < \infty] \quad (2.28)$$

Значения этих функций определяется также из выражения:

$$\operatorname{sh} x = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x}) \quad (2.29)$$

$$\operatorname{ch} x = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x}) \quad (2.30)$$

Расчет индуктивности

Индуктивность цепи L характеризуется отношением магнитного потока Φ к току I , создавшему этот поток - $L = \frac{\Phi}{I}$. Она состоит из наружной межпроводниковой индуктивности и внутренней индуктивности внутреннего и внешнего проводника и определяется на частотах >60 кГц по формуле (2.8). В случае, если внутренний проводник медный, а внешний – алюминиевый, следует использовать уравнение:

$$L = L_a + L_o + L_{BH} = \left[\left(\frac{133.3}{\sqrt{f}d} + \frac{172}{\sqrt{f}d} \right) + 2\ell n \frac{D}{d} \right] 10^{-4}, \text{ Гн/м} \quad (2.31)$$

При определении индуктивности и внутренней индуктивности внутреннего и внешнего проводника и определяется на частотах >60 кГц расчеты следует производить по полным формулам.

Индуктивность внутреннего проводника в этом случае определяется из выражения:

$$L_a = \frac{1}{2} \mu_r Q(kr) 10^{-4}, \text{ Гн/км} \quad (2.32)$$

Значение $Q(kr)$ и аргумент функции kr определяются по аналогии с другой специальной функцией Бесселя $F(kr)$ из табл.2.1 и 2.3. Методика нахождения этого параметра рассмотрена при расчете сопротивления коаксиальных пар.

Индуктивность внешнего проводника на частотах <60 кГц определяется из выражения:

$$L_o = \frac{10^3}{2\pi_b \sigma} \frac{k}{\sqrt{2}\omega} \frac{\operatorname{sh} u - \sin u}{\operatorname{ch} u - \cos u}, \text{ Гн/км} \quad (2.33)$$

где

r_b -внутренний радиус внешнего проводника, мм,

σ -проводимость металла(табл.2.1)

ω -круговая частота ($\omega = 2\pi f$)

k -коэффициент вихревых токов;

$$u = \sqrt{2kt}$$

Внешняя межпроводниковая индуктивность обусловлена межпроводниковым магнитным потоком Φ , не зависит от частоты и определяется из выражения

$$L_{\text{вн}} = \left[2\mu_r \ln \frac{D}{d} \right] \cdot 10^{-4}, \text{ Гн/км.} \quad (2.34)$$

Внутренняя индуктивность по абсолютной величине значительно меньше наружной и с ростом частоты ее относительное значение существенно снижается.

Расчет емкости.

Емкость коаксиальной пары аналогична емкости цилиндрического конденсатора. Его электрическое поле создается между двумя цилиндрическими поверхностями с общей осью. Емкость определяется по формуле (2.9). В ряде случаев вместо данного выражения, в которое входит абсолютная диэлектрическая проницаемость изоляции коаксиальной пары, удобнее использовать формулу:

$$C = \frac{\varepsilon_r 10^{-6}}{18 \ln \frac{D}{d}}, \text{ Ф/км.} \quad (2.35)$$

где ε_r -относительная диэлектрическая проницаемость.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость среды- ε_a связана с относительной диэлектрической проницаемостью среды- ε_r выражением:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (2.36)$$

где ε_0 —электрическая постоянная, равная (в системе СИ) $10^{-9}/(36\pi)$ Ф/м.

Относительная диэлектрическая проницаемость всех материальных тел больше 1, или, другими словами, всякая материальная среда, уменьшает напряженность электрического поля, созданного зарядом, по сравнению с полем в пустоте.

В ряде случаев возникает необходимость в расчете эквивалентной относительной диэлектрической проницаемости изоляции, особенно при различных соотношениях твердого диэлектрика и воздуха. Ее величина будет определяться из выражения:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_1 S_1 + \varepsilon_2 S_2}{S_1 + S_2} \quad (2.37)$$

где

ε_1 и ε_2 -относительные диэлектрические проницаемости соответственно первого и второго диэлектриков;

S_1 и S_2 - площади поперечного сечения первого и второго диэлектрика.

Эквивалентное значение диэлектрической проницаемости для шайбовой изоляции коаксиальной пары определяется выражением (2.3).

Коаксиальные кабели, как правило, имеют сложную комбинированную изоляцию. Результирующие эквивалентные значения относительной диэлектрической проницаемости ε_s при таких комбинированных изоляциях приведены в таблице 2,4.

Таблица 2,4.

Тип кабеля	Тип изоляции	ε_3	Отношение V_d/V_B	$\operatorname{tg} \delta_3 \cdot 10^{-4}$ при частоте МГц			
				1	5	10	60
2,6/9,5	Полиэтиленовая шайба	1,13	8,9	0,5	0,5	0,7	0,8
2,6/9,5	Полиэтиленовая спираль	1,1	6	0,4	0,4	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	1,0	1,2

Расчет проводимости.

Проводимость изоляции G характеризует потери энергии в изоляции проводников коаксиальной пары. Проводимость изоляции обусловлена сопротивлением изоляции изолирующего материала и дтэлектрическими потерями. Проводимость за счет диэлектрических потерь определяется из выражения (2.10).

Проводимость, обусловленная утечкой тока в силу несовершенства изоляции, определяется из выражения $G_0 = 1/R_{из}$. Величина проводимости изоляции обратно пропорциональна сопротивлению изоляции кабеля. В коаксиальных кабелях $R_{из}$ для коаксиальных пар среднего типа нормируется величиной 10 000 МОм*км. В результате проводимость изоляции коаксиального кабеля определяется из выражения:

$$G = \frac{1}{R_{из}} + \omega C \operatorname{tg} \delta, \text{ См/км.} \quad (2.38)$$

В используемом диапазоне частот первым членом можно пренебречь. Проводимость изоляции с ростом частоты линейно возрастает и ее величина зависит от качества диэлектрика, характеризуемого величиной угла диэлектрических потерь.

По аналогии с нахождением эквивалентной диэлектрической проницаемости в ряде случаев возникает необходимость в расчете эквивалентной величины $\operatorname{tg} \delta$. Его значение будет определяться из выражения:

$$\operatorname{tg} \delta_3 = \frac{\varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1 S_1 + \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 S_2}{\varepsilon_1 S_1 + \varepsilon_2 S_2} \quad (2.39)$$

где

ε_1 и ε_2 -относительные диэлектрические проницаемости соответственно первого и второго диэлектриков;

S_1 и S_2 - площади поперечного сечения первого и второго диэлектрика.

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

Результатирующие эквивалентные значения тангенса диэлектрических потерь при комбинированных изоляциях приведены в таблице 2,4.

Варианты задач.

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

Задача 2. При эксплуатации магистрали использующей кабель МКТ, была изменена схема дистанционного питания, в результате чего напряжение постоянного тока было подключено к внутреннему и внешнему проводнику одной коаксиальной пары. Найти сопротивление новой цепи дистанционного питания.

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

Задача 4. При изготовлении коаксиальной пары для кабеля КМ-4 был сбой в набивке изоляционных шайб. В результате этого расстояние между шайбами стало равным 35 мм. Определить, на сколько изменилась емкость коаксиальной пары.

Задача 5. Определить на сколько 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.

Задача 6. Сравнить расчетные данные сопротивления коаксиального кабелей ВКПАШп-1, полученные по полным и упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи К-120. Расчеты проводить на нижней частоте передаваемых сигналов.

Задача 7. Сравнить расчетные данные сопротивления коаксиальной пары 2,6/9,5 коаксиального кабеля КМ-8/6, полученные по полным и упрощенным формулам на кабеле работает система передачи ИКМ-1920. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

Задача 8. При эксплуатации магистрали, использующей кабель КМ-4, была изменена схема дистанционного питания, в результате чего напряжение постоянного тока было подключено к внутреннему и внешнему проводнику одной коаксиальной пары. Найти сопротивление новой цепи дистанционного питания.

Задача 9. Сравнить расчетные данные индуктивности коаксиальной пары в кабеле МКТ-4, полученные по полным и упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи К-300. Расчеты проводить на нижней частоте передаваемых сигналов.

Задача 10. Сравнить расчетные данные индуктивности коаксиальной пары 2,6/9,5 коаксиального кабеля КМ-8/6, полученные по полным и

упрощенным формулам. На кабеле работает система передачи ИКМ-1920. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

Список литературы

1. Гроднев И.И., Верник С.М., Кочановский Л.Н. Линии связи.- М.: Радио и связь, 1995.
2. Барон Д.А., Гроднев И.И. и др. Справочник. Строительство кабельных сооружений связи.- М.: Радио и связь, 1988.
3. Ионов А.Д., Попов Б.В. Линии связи: Учеб. Пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 1988.
4. Гроднев И.И., Фролов П.А. Коаксиальные кабели связи.- М.: Связь, 1970.
5. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Задачник по курсу «Линии связи», часть 1: Учебное пособие/МТУСИ.- М., 1995.

Контрольное задание №6

Расчет вторичных параметров коаксиальных цепей

Методические указания

Расчет волнового сопротивления

По своей природе волновое сопротивление не зависит от длины кабельной линии и постоянно в любой точке, однако оно существенно зависит от частоты. Коаксиальные кабели практически используются в спектре > 60 кГц, где $R \ll \omega L$ и $G \ll \omega C$, поэтому обычно вторичные параметры рассчитываются по упрощенным формулам.

В области высоких частот (при $f > 40$ кГц) волновое сопротивление определяется из выражения (2.11).

Величина волнового сопротивления коаксиального кабеля на частотах > 2 МГц уже практически не изменяется и может определяться непосредственно через габаритные размеры коаксиальной пары (d и D) и параметры изоляции (ϵ):

$$Z_B = \frac{1}{2\pi} Z_0 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d}, \text{ Ом}, \quad (2.40)$$

где

Z_0 - волновое сопротивление воздушного пространства, Ом.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 376,6 \text{ Ом}$$

Для среды $\epsilon_r = 1$ волновое сопротивление можно определить из выражения:

$$Z_B = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d}, \text{ Ом} \quad (2.41)$$

Для определения волнового сопротивления на низких частотах можно воспользоваться выражениями используемыми для оценки Z_B симметричных цепей. [5]

Расчет коэффициента затухания

В областях высоких частот (при > 60 кГц) для оценки коэффициента затухания следует пользоваться формулой (2.12). В этой формуле первый член учитывает потери в металле, а второй – потери в диэлектрике.

Величина волнового сопротивления коаксиального кабеля на этих частотах может определяться непосредственно через габаритные размеры коаксиальной пары и параметры изоляции:

Для определения затухания на частотах ниже 60 кГц можно пользоваться формулами, представленными в [5]

В области высоких частот коэффициент затухания, как и другие вторичные параметры передачи коаксиальных кабелей, целесообразно выражать непосредственно через габаритные размеры (d и D) и параметры изоляции (ε и $\text{tg}\delta$):

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_o = \frac{6,05\sqrt{f\varepsilon_o}}{\ln(D/d)} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \cdot 10^{-3} + 9,08 \cdot f \sqrt{\varepsilon_o} \cdot \text{tg}\delta \cdot 10^{-5}, \text{ дБ/км} \quad (2.42)$$

Из выражения видно, что потери в металле α_m изменяются от частоты пропорционально \sqrt{f} и поэтому возрастают медленнее, чем потери в диэлектрике α_d , связанные с f линейным законом. Однако в практически используемом спектре частот передачи по коаксиальным кабелям величина потерь в диэлектрике незначительна и достигает 2-3% от α_m .

Расчет коэффициента фазы

Коэффициент фазы определяет угол сдвига между током (или напряжением) на протяжении одного километра. Для определения коэффициента фазы в областях высоких частот (при $f > 40$ кГц) можно пользоваться выражением (2.13) или выражением:

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a}, \text{ рад/км} \quad (2.43)$$

Коэффициент фазы можно также выразить через ε :

$$\beta = \omega \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_o}}{c}, \text{ рад/км} \quad (2.44)$$

где

c – скорость света (300000 км/с).

При необходимости оценить коэффициент фазы на частотах ниже 40 кГц можно пользоваться формулами, представленными в [5].

Если затухание цепи определяет дальность связи, то коэффициент фазы обуславливает скорость распространения энергии по линии.

Расчет скорости распространения энергии

Скорость распространения электромагнитной энергии является функцией частоты и фазовой постоянной, которая в свою очередь зависит от

первичных параметров линии. В общем виде, как и в симметричных кабелях, она определяется по формуле:

$$v = \frac{\omega}{\beta}, \text{ км/с} \quad (2.45)$$

В области высоких частот ($f > 40 \text{ кГц}$), когда скорость не зависит от частоты и определяется только параметрами кабеля, следует использовать формулу (2.14), однако на частотах $f > 5 \text{ МГц}$ скорость распространения электромагнитной энергии можно также выразить через ε :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}, \text{ км/с} \quad (2.46)$$

где

c - скорость света ($300\,000 \text{ км/с}$).

Для расчета скорости распространения электромагнитной энергии в области низких частот ($f < 40 \text{ кГц}$) можно пользоваться формулами, представленными в [5].

Скорость передачи энергии по коаксиальным кабелям выше, чем по симметричным, и почти приближается к скорости распространения электромагнитных волн в воздухе.

Варианты задач

Задача 1. Определить, на сколько 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.

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

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

Задача 4. Определить, насколько быстрее движется высокочастотная составляющая сигнала от низкочастотной составляющей по коаксиальной паре в кабеле КМ-4, если кабель работает с системой передачи К-1920.

Задача 5. Определить, на сколько отличаются волновые сопротивления коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6 и МКТ-4, если по коаксиальной паре 2,6/9,5 мм комбинированного 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.

Задача 6. Определить, на сколько отличаются волновые сопротивления коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6 и

ВКПАШп-1 если по коаксиальной паре 2,6/9,5мм комбинированного кабеля КМ-8/6 работает система передачи ИКМ-1920, а по кабелю ВКПАШп-1 система передачи К-120. Расчеты проводить на верхних частотах передаваемых сигналов.

Задача 7. Сравнить расчетные данные затухания в кабеле КМ-8/6, полученные по полным и упрощенным формулам на кабеле по коаксиальной паре 2,5/9,5мм работает система передачи ИКМ-1920. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

Задача 8. Сравнить расчетные данные затухания в кабеле ВКПАШп-1, полученные по полным и упрощенным формулам. По кабелю работает система передачи К-120. Расчеты проводить в верхней частоте передаваемых сигналов.

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

Задача 10. Определить, во сколько раз отличается коэффициент фазы коаксиальных пар в комбинированном кабеле КМ-8/6, если по коаксиальной паре 2,6/9,5мм работает система передачи ИКМ-1920, а по паре 1,2/4,6мм система передачи ИКМ-480. Расчеты проводить на полутактовой частоте.

Список литературы

1. Гроднев И.И., Верник С.М., Кочановский Л.Н. Линии связи.- М.: Радио и связь, 1995.
2. Барон Д.А., Гроднев И.И. и др. Справочник. Строительство кабельных сооружений связи.- М.: Радио и связь, 1988.
3. Ионов А.Д., Попов Б.В. Линии связи: Учеб. Пособие для вузов.- М.: Радио и связь, 1988.
4. Гроднев И.И., Фролов П.А. Коаксиальные кабели связи.- М.: Связь, 1970.
5. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Задачник по курсу «Линии связи», часть 1: Учебное пособие/МТУСИ.- М., 1995.

Контрольное задание №7

Расчет элементов конструкций оптических кабелей

Методические указания.

Существует большое количество разнообразных типов конструкций оптических кабелей (ОК). Их можно подразделить на четыре группы: кабели концентрической повивной скрутки, кабели с профилированным сердечником, плоские кабели ленточного типа и кабели пучковой скрутки. При механическом расчете ОК элементы кабеля рассматривают как систему независимо деформирующих цилиндров, пренебрегая их поперечным

взаимодействием при растяжении вдоль оси кабеля, состоящей из n элементов, можно оценить по формуле (3.1). Коэффициент, учитывающий расположение элементов конструкций кабеля [1], имеет следующие значения:

- $k_1=1$ для элементов, параллельных оси кабеля (испытывающих механическое напряжения);
- $k_1=0$ для элементов, не испытывающих механическое напряжения (обычно оптических волокон);
- $k_1=\cos\psi_i$ для элементов, испытывающих напряжения и расположенных по спирали с углом подъема ψ_i (обычно для оптических модулей можно считать угол подъема $30\div 35^\circ$).

Значения модулей продольной упругости и других параметров материалов элементов конструкций ОК представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Материал	Удельный вес, г/см ³	Модуль упругости Па
Сталь	7,9	$20000 \cdot 10^7$
Медь	$8,71 \div 8,9$	$12000 \cdot 10^7$
Кварцевое волокно	2,48	$8600 \cdot 10^7$
Алюминий	2,70	$7000 \cdot 10^7$
Полиэтилен	$0,92 \div 0,93$	$15 \cdot 10^7 \div 25 \cdot 10^7$
Фторопласт	$2,1 \div 2,3$	$225 \cdot 10^7$
Поливинилхлорид	$1,3 \div 1,7$	$300 \cdot 10^7$
Полистирол	$1,04 \div 1,06$	$120 \cdot 10^7 \div 150 \cdot 10^7$
Полиуретан	$1,1 \div 1,25$	$0,5 \cdot 10^7 \div 10 \cdot 10^7$
Нейлоновое волокно	1,14	$600 \cdot 10^7 \div 1300 \cdot 10^7$
Кевларовое волокно	1,44	$12500 \cdot 10^7$
Волокно СВМ	1,25	$6500 \cdot 10^7$

При переводе значений давления из килограмм·сила на квадратный метр в паскали следует пользоваться следующими соотношениями

$1 \text{ кгс} = 9,807 \text{ Н}$; $1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,807 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $1 \text{ кгс/м}^2 = 9,807 \text{ Па}$

Соотношения единиц измерения удельного веса в системах СГС, МКС, СИ и МКГСС следующие: $1 \text{ дин/см}^3 = 10 \text{ н/м}^3$; $1 \text{ кг/м}^3 = 9,81 \text{ н/м}^3$.

Коэффициент допустимого продольного растяжения для разных типов конструкций ОК меняется в пределах $\delta = 0,01 \div 0,025$.

В случае продольного армирования кабеля одной центральной жилой из высокопрочного материала, ее сечение может быть определено из выражения:

$$S_{\text{арм}} = \frac{1}{E_{\text{арм}}} \left(\frac{F}{\delta} - \sum_{i=1}^{n-1} k_i E_i S_i \right), \quad (3.23)$$

где

δ – коэффициент допустимого продольного растяжения конструкции кабеля;

k_i – коэффициент, учитывающий расположение i -го элемента относительно оси конструкции кабеля;

E_i – модуль продольной упругости материала i -го элемента конструкции кабеля, Па.

S_i – поперечное сечение i -го элемента конструкции кабеля, м².

Варианты задач

Задача 1. На сколько изменилась допустимая нагрузка на растяжение конструкции оптического кабеля ОК-50-2-5-8, если при изготовлении кабеля заменили материал центрального упрочняющего материала с нитей СВМ на кевлар. Диаметр центрального упрочняющего элемента в обоих случаях составляет 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 $\delta=0,01$.

Задача 2. На сколько изменится радиус сердцевины центрального упрочняющего элемента (изготовленной из нитей СВМ) оптического кабеля ОК-50-2-5-8, если требуется получить конструкцию с минимально допустимым для линейных кабелей растягивающим усилием. Внешний диаметр центрального упрочняющего элемента в обоих случаях составляет 3,7 мм при толщине поливинилхлоридной оболочки = 0,5 мм. Толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,5 мм. Наружный диаметр кабеля 13 мм. Коэффициент допустимого продольного растяжения кабеля $\delta=0,01$.

Задача 3. На сколько изменилась допустимая нагрузка на растяжении конструкции оптического кабеля ОК-50-2-3-8, если при изготовлении кабеля внешний диаметр оболочки изменялся в пределах нормы? Центральный упрочняющий элемент изготовлен из нитей СВМ. Диаметр центрального упрочняющегося 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 $\delta=0,015$.

Задача 4. Какой объем гидрофобного заполнителя потребуется для наполнения свободного внутреннего пространства конструкции оптического кабеля ОК-50-2-5-8? Диаметр центрального упрочняющегося элемента = 3,7 мм; толщина внешней полиэтиленовой оболочки 1,5 мм, наружный диаметр кабеля 13 мм.

Задача 5. На сколько изменилась допустимая нагрузка на растяжении конструкции оптического кабеля ОК-50-2-3-8, если при изготовлении кабеля заменили материал центрального упрочняющего элемента с нитей СВМ на сталь? Диаметр центрального упрочняющегося элемента в обоих случаях составляет 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 $\delta=0,02$.

Список использованной литературы

1. Иванов С. И., Коршунов В. Н., Ксенофонтов С.Н. Сборник упражнений и задач по волоконно-оптическим линиям связи: Учебное пособие/МЭИС.-М., 1987.

2. Справочник. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. /Под редакцией И. И. Гроднева.-М.: Радио и связь, 1993.
3. Горднев И. И., Верник С. М., Кочановский Л.Н. Линии связи.- М.: Радио и связь, 1995.

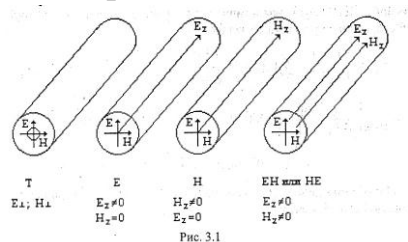
Контрольное задание №8

Расчет параметров оптических кабелей

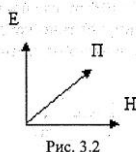
Методические указания

Процесс распространения электромагнитной волны в оптическом волокне можно анализировать методами геометрической оптики и методами волновой теории путем решения уравнений Максвелла. Первый метод более прост и пригоден при инженерном походе в решении конкретных задач, второй метод целесообразен для детального исследования характеристик световодов.

Следует разделять электромагнитные волны, распространяемые в световоде, на классы и типы. В направляющих системах существуют волны следующих классов (рис.3.1): Т – поперечная электромагнитная; Е – электрическая волна; Н – магнитная волна; НЕ и ЕН – гибридные, смешанные волны [3]. На рисунке векторы E и H представлены в цилиндрической системе координат.



Электромагнитная волна характеризуется тройкой векторов – вектором электрического поля E , вектором магнитного поля H и вектором Пойнтинга P , показывающим направление распространения электромагнитной волны (рис.3.2).



При распространении электромагнитной волны в различных типах направляющих систем эта тройка векторов может менять общую ориентацию, но при этом быть строго перпендикулярно друг к другу.

Электромагнитный поток волны Т содержит только поперечные составляющие поля E_{\perp} и H_{\perp} , вектор, P при этом направлен строго вдоль оси направляющей системы. Такие волны существуют в двухпроводных линиях передачи (симметричных, коаксиальных).

Электромагнитный поток волн Е или Н, кроме соответственно поперечных составляющих электрического и магнитного поля, имеет еще и продольные составляющие этих полей, что в геометрической интерпретации

говорит о повороте тройки векторов по отношению к оси направляющей системы (вектор Π при этом уже направлен под углом к оси направляющей системы). Такие волны возбуждаются в металлических волноводах.

Электромагнитный поток волн EH и HE имеет продольные составляющие как электрических, так и магнитных полей. При преобладании в поперечном сечении составляющих электрического поля – волна EH , а при преобладании в поперечном сечении составляющих магнитного поля – волна HE . Вектор Пойнтинга будет также направлен под углом к оси направляющей системы.

Наряду с делением на классы электромагнитные волны, распространяемые в направляемых системах, делятся также по типам. Типы волн характеризуют сложность структуры электромагнитного поля волны и различаются числом максимумов и минимумов поля в поперечном сечении световодов. При этом один и тот же класс волн может иметь различное число типов волн, в зависимости от структуры световода и характеристик источника излучения.

Так, электромагнитная волна класса EH , распространяясь в различных световодах, может иметь различные типы структуры потока электромагнитного поля EH_{nm} , где n – число изменений векторов поля по периметру сердцевины оптического волокна, а m – число изменений поля по диаметру сердцевины оптического волокна (рис.3.3)

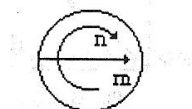


Рис. 3.3

Схематические диаграммы векторов электромагнитного поля для различных мод представлены на рис.3.4.

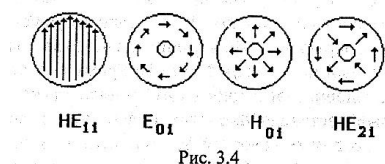


Рис. 3.4

Значения n и m будут зависеть от параметров световода, его диаметра и длины волны передаваемого сигнала.

Такой подход в классификации типов волн вызван тем, что в световоде распространяется не плоская волна, а волна, имеющая фронт сложной конфигурации. Чтобы математически описать процесс распространения такой волны, следует заменить фронт этой волны на фронт в виде многогранника с элементарными плоскими площадками. Каждая такая площадка характеризует элементарную плоскую волну, процесс распространения которой описывается известными уравнениями Максвелла (рис.3.5).

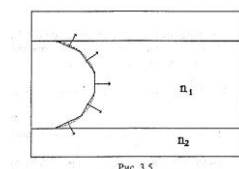


Рис. 3.5

Исходя из геометрической интерпретации процесса распространения электромагнитных волн, нормаль каждой элементарной площадки (элементарная плоская волна) будет направлена в определенном направлении вдоль своего вектора Пойнтинга.

В геометрической трактовке эту нормаль считать лучом, а саму площадку с нормалью (энергию электромагнитной волны) – модой электромагнитной волны. Диаметр элементарной площадки будет соответствовать длине распространяемой волны. Следовательно, количество направляемых мод определяется числом элементарных плоских площадок, которые можно разместить в сечении сердцевины ОВ (рис.3.6).

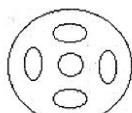


Рис. 3.6

Таким образом, класс электромагнитных волн характеризуется расположением тройки векторов E, H и P в электромагнитном потоке, а тип электромагнитных волн характеризуется конфигурацией (расположением) и числом распространяемых мод.

Число мод

Общее число передаваемых мод в световодах может быть определено по формуле (3.7). Для волокон ступенчатого и градиентного профиля это выражение принимает вид:

$$N = \frac{V^2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 - \text{для ступенчатого профиля} \quad (3.24)$$

$$N = \frac{V^2}{2} = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)^2 - \text{для градиентного профиля} \quad (3.25)$$

где V – нормированная частота, a – радиус сердцевины волокна, n_1 – показатель преломления сердцевины волокна, n_2 – показатель преломления оболочки, λ – длина волны оптического сигнала.

Нормированная часть

Важным обобщенным параметром волоконного световода является нормированная (характеристическая) частота – V . Ее величина определяется по формуле (3.6). С увеличением радиуса сердцевины волокна величина V растет, а с увеличением длины волны – уменьшается. В табл. 3.2 приведены соотношения нормированной частоты, длины волны и радиуса коэффициента преломления оболочки ($n_1 = 1,51$).

Таблица 3.2

λ , мкм	Значение V при a , мкм							
	4		5		25		50	
	n_2							
	1,49	1,5	1,49	1,5	1,49	1,5	1,49	1,5
0,85	7,24	5,1	9,05	6,2	45,2	32,1	90,5	63,9
1,00	6,15	4,2	7,69	5,2	38,5	27,1	76,9	54,3
1,30	4,73	3,2	5,92	4,1	29,3	21,4	59,2	41,8

1,55	3,97	2,7	4,96	3,4	25,2	17,6	49,6	35,1
------	------	-----	------	-----	------	------	------	------

Одномодовый режим реализуется, если нормированная частота $V \leq 2,405$. Чем меньше разность $\Delta n = n_1 - n_2$, тем при большем радиусе световода обеспечивается одномодовый режим. Так, если $n_1 = 1,46$, то при $\Delta n = 0,001$ радиус $a < 2,24 \lambda$, а при $\Delta n = 0,003$ радиус сердцевинки $a < 4,094 \lambda$.

Апертура

При расчете параметров передачи необходимо учитывать, что в световоде границей раздела сред сердцевинки - оболочки являются прозрачные стекла. Поэтому возможно не только отражение оптического луча, но и проникновение его в оболочку. Для предотвращения перехода энергии в оболочку излучения в окружающее пространство необходимо соблюдать условие полного внутреннего отражения и апертуру.

Апертура – это угол между оптической осью и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец волоконного световода, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения. Этот телесный угол θ_A характеризуется числовой апертурой, определяемой из выражения (3.5) и связан с ней следующим соотношением:

$$NA = \sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (3.26)$$

При переходе из среды с большей плотностью в среду с меньшей плотностью, т.е. при $n_1 > n_2$ волна при определенном угле падения полностью отражается и не переходит в другую среду.

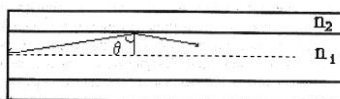


Рис. 3.7

Угол падения (рис. 3.7), начиная с которого вся энергия отражается от границы раздела сред, называется углом полного внутреннего отражения :

$$\sin \theta_A = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_2}{\mu_1 \varepsilon_1}}. \quad (3.27)$$

где

μ_1 и μ_2 – магнитная проницаемость сердечника и оболочки соответственно;
 ε_1 и ε_2 – диэлектрическая проницаемость сердечника и оболочки.

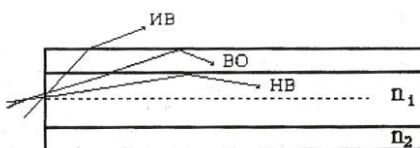


Рис. 3.8. Группы распространяемых волн

В общем случае в оптическом волокне из общего потока распространения электромагнитных волн можно выделить три группы волн (рис. 3.8): направляемые волны (НВ), волны оболочки (ОВ) и излучаемые волны (ИБ). Волны оболочки и излучаемые волны иногда объединяют в одну группу – вытекающие волны (ВВ). Такое разделение на группы вызвано тем, что в момент прохождения электромагнитного потока энергии через границу раздела сердцевина – оболочка начинает действовать закон отражения.

При попадании электромагнитного потока в волокно одна группа лучей (направляемые волны или волны сердцевинки) попадает на границу раздела сердцевина – оболочка под углом, меньшим угла полного внутреннего отражения. Направляемые волны

распространяются далее по волокну и обеспечивают передачу информации, а излучаемые волны излучаются в пространство уже в начале волокна (однако они могут возникать в местах нерегулярностей).

Волны оболочки (часть вытекающих волн) являются промежуточной группой волн. Большая часть их энергии распространяется в оболочке, однако при определенных условиях они могут излучаться из волокна или переходить в сердцевину и отдавать энергию направляемым волнам.

Излучаемые волны и волны оболочки – это паразитные волны, снижающие общее количество полезной передаваемой энергии и увеличивающие дисперсию передаваемых сигналов.

Критические длины волн и частоты

По оптическим волокнам возможна передача электромагнитных волн длиной меньше критической длины волны. Величины критической частоты волны и критической длины можно определить из выражений (3.21) и (3.22). В этих выражениях параметр P_{mn} характеризует тип волны (моду). Для оценки P_{mn} следует воспользоваться табл. 3.3.

Таблица 3.3

n	Значение P_{mn} при m			Тип волны
	1	2	3	
0	2,405	5,520	8,654	E_{0m}, H_{0m}
1	0,000	3,832	7,016	HE_{nm}
1	3,832	7,016	10,173	HE_{nm}
2	2,445	5,538	8,665	HE_{nm}
2	5,136	8,417	11,620	HE_{nm}

Как видно из табл. 3.3, только одна одномодовая волна HE_{11} не имеет критической частоты. Для нее нормированная частота находится в пределах $0 < V < 2,405$.

Варианты задач

Задача 1. Определить число мод, распространяющихся в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01-4, при $n_2=1,490$, $\Delta=0,01$. На сколько изменится число мод при изменении диаметра сердцевины ОВ в пределах нормы?

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

Задача 3. Определим, на сколько отличается величина числовой апертуры в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01 от числовой апертуры в оптическом волокне оптического 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 $n_1=1,510$.

Задача 4. На сколько изменится критическая частота в оптических волокнах оптического кабеля типа ОКЛ-01 при изменении диаметра сердцевины ОВ в пределах нормы? Значения параметров ОВ- $n_2 = 1,49$, $\Delta=0,01$, тип волны HE_{12} .

Задача 5. На сколько изменится критическая длина волны в оптических волокнах оптического кабеля типа ОКЛ-01, если изменился передаваемый тип волны и вместо E_{01} передается HE_{21} ? Значения параметров ОВ $n_1=1.504$, $\Delta=0.01$.

Задача 6. Определить число мод, распространяющихся в оптическом волокне оптического кабеля типа ОК-50-2-5-4, при $n_2=1,5$, $\Delta=0,012$. На сколько изменится число мод при увеличении диаметра сердцевины ОВ в пределах нормы?

Задача 7. Определить, во сколько раз отличаются величина нормированной частоты в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКК-50-01 от нормированной частоты оптического волокна оптического кабеля типа ОКЛБ-01-0,3 при $n_1=1,5$, $\Delta=0,011$.

Задача 8. Определить, на сколько отличается величина числовой апертуры оптического волокна оптического кабеля типа ОКК-50-01 от числовой апертуры оптического волокна оптического 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 $n_1=1,508$.

Задача 9. Насколько изменится критическая частота в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКЛС-01 при увеличении диаметра сердцевины в пределах нормы? Значения параметров ОВ - $n_2=1,48$, $\Delta=0,01$, тип волны HE_{21} .

Задача 10. На сколько изменится критическая частота в оптическом волокне оптического кабеля типа ОКЛС-01, если изменился передаваемый тип волны и вместо E_{01} передается EH_{11} ? значения параметров ОВ - $n_1=1,5$, $\Delta=0,011$.

Список использованной литературы

1. Иванов С. И., Коршунов В. Н., Ксенофонов С.Н. Сборник упражнений и задач по волоконно-оптическим линиям связи: Учебное пособие/МЭИС.-М., 1987.
2. Справочник. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. /Под редакцией И. И. Гроднева.-М.: Радио и связь, 1993.
3. Горднев И. И., Верник С. М., Кочановский Л.Н. Линии связи.- М.: Радио и связь, 1995.

Контрольное задание № 9

Расчет затухания в оптических кабелях

Методические указания

Затухание в оптических волокнах

Затухание является важнейшим параметром оптических кабелей. Затухание обусловлено собственными потерями в волоконном световоде α_c и дополнительными потерями, так называемыми α_k , обусловленными

скруткой, а также деформацией и изгибами оптических волокон при наложении покрытий и защитных оболочек в процессе изготовления ОК:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (3.28)$$

Собственные потери волоконного световода состоят из потерь поглощения $\alpha_{\text{п}}$ и потерь рассеяния $\alpha_{\text{р}}$:

$$\alpha_c = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} \quad (3.29)$$

Потери, возникающие при распространении сигнала по волоконному световоду, объясняется тем, что часть мощности, поступающей на вход световода, рассеивается вследствие изменения направления распространения лучей на нерегулярностях и их высвечивания в окружающее пространство ($\alpha_{\text{р}}$), другая часть мощности поглощается как самими молекулами кварца ($\alpha_{\text{п}}$), так и посторонними примесями ($\alpha_{\text{пр}}$), выделяясь в виде джоулева тепла. Примесями могут являться ионы металлов (никель, железо, кобальт и др.) и гидроксильные группы (ОН), приводящие к появлению резонансных всплесков затухания. В результате суммарные потери определяются из выражения:

$$\alpha = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{к}} \quad (3.30)$$

Затухание за счет поглощения связано с потерями на диэлектрическую поляризацию, линейно растет с частотой, существенно зависит от свойств материала оптического волокна ($\text{tg}\delta$) и рассчитывается по формуле (3.8). Потери рассеяния обусловлены неоднородностями материала волоконного световода, расстояния между которыми меньше длины волны, и тепловой флуктуацией показателя преломления. Величина потерь на рассеяние, называемое рэлеевским, определяется по формуле (3.9). Потери на рэлеевское рассеяние определяют нижний предел потерь, присущих волоконным световодам. Этот предел различен для различных волн и с увеличением длины волны уменьшается. Потери на поглощение растут линейно с увеличением частоты, а потери на рассеяние существенно быстрее - по закону f^4 .

При распространении электромагнитной волны с $\lambda > 2$ мкм начинают интенсивно расти потери на поглощение. Это обусловлено иным механизмом потерь кварцевых ВС в инфракрасной области спектра. Эти потери пропорциональны показательной функции и уменьшаются с ростом частоты по закону:

$$\alpha_{\text{и.к.}} = C e^{-k/\lambda}, \text{ дБ/км}, \quad (3.31)$$

где

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

В световоде существует три окна прозрачности: первое окно прозрачности на длине волны 0,85 мкм, второе окно прозрачности на длине волны 1,3 мкм и третье окно прозрачности на длине волны 1,55 мкм. Наименьшее затухание имеется в третьем окне прозрачности.

Затухание в оптических кабелях

Дополнительное затухание, обусловленное кабельными потерями ($\alpha_{\text{к}}$), состоит из суммы, по крайней мере, семи видов парциальных коэффициентов затухания:

$$\alpha_k = \sum_{i=1}^7 \alpha'_i, \quad (3.32)$$

где

α'_1 – возникает вследствие приложения к ОВ термомеханических воздействий в процессе изготовления кабелей;

α'_2 – вследствие температурной зависимости коэффициента преломления материала ОВ;

α'_3 – вызывается микроизгибами ОВ;

α'_4 – возникает вследствие нарушения прямолинейности ОВ (скрутка);

α'_5 – возникает вследствие кручения ОВ относительно его оси (осевые напряжения скручивания);

α'_6 – возникает вследствие неравномерности покрытия ОВ;

α'_7 – возникает вследствие потерь в защитной оболочке ОВ.

Таким образом, дополнительные потери определяются в основном процессами рассеяния энергии на неоднородностях, возникающих вследствие перечисленных влияний, и частично увеличением потерь на поглощение энергии. Причинами увеличения потерь на поглощение являются остаточные осевые и поперечные напряжения в ОВ, могущие возникнуть при изготовлении кабеля,

В ряде случаев микроизгибы могут существенно влиять на прирост α_k . Значение потерь на одном микроизгибе может изменяться в пределах 0,01 – 0,1 дБ. Приращение затухания от микроизгибов α'_3 зависит от мелких локальных нарушений прямолинейности ОВ, характеризующихся смещением оси ОВ в поперечных направлениях на участке микроизгиба. Основными причинами появления микроизгибов являются локальные неосесимметричные механические усилия различного происхождения, приложенные к очень малым участкам ОВ. К микроизгибам следует отнести такие поперечные деформации ОВ, для которых максимальное смещение оси ОВ соизмеримо с диаметром сердцевинки волокна. Особенности микроизгибов является то, что они, как правило, многочисленны, расстояние между соседними микроизгибами существенно больше их размера. Общий вклад потерь, создаваемых микроизгибами, может быть значителен. Вследствие микроизгиба происходит ограничение апертурного угла излучения, распространяющегося по ОВ, и часть энергии излучается из ОВ. Зависимость приращения затухания от микроизгибов α'_3 можно определить из выражения:

$$\alpha'_3 = k_3 N_n y_n^2 \frac{a^4}{\Delta^3 b^6} \left(\frac{E_0}{E_c} \right)^{3/2}, \quad (3.33)$$

где

k_3 – 0,9 – 1,0;

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

a – радиус сердцевинки;

b – диаметр оптической оболочки;

Δ - относительное значение показателя преломления;
 n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевины и оболочки;
 E_0 и E_c - модули Юнга оболочки и сердцевины ОВ.

с километрическим затуханием. На затухание сprostка большое значение **Затухание в местах соединений оптических волокон**

В отличие от традиционных кабелей затухание в сprostках ОВ может достигать больших величин, соизмеримых оказывает поперечное смещение и смещение осей. На рис. 3.9 приведены возможные варианты дефектов сопряжения ОВ (радиальное, угловое и осевое смещение).

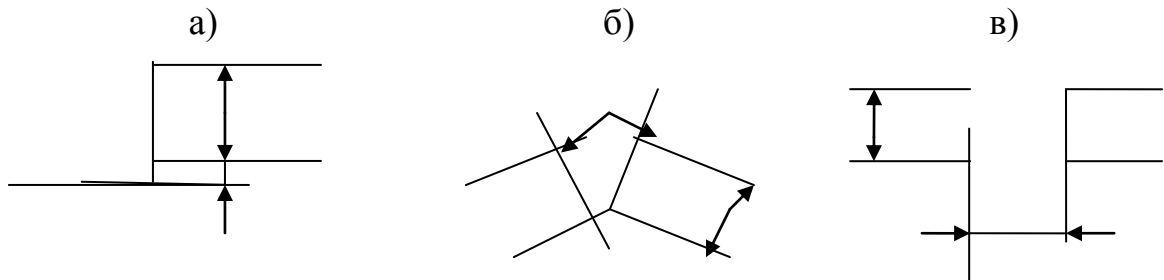


Рис. 3.9. Радиальное(а), угловое (б), и осевое (в) смещение оптических волокон

При радиальном смещении дополнительные потери определяются из формулы:

$$A_{\delta}=10\lg \frac{d}{d-\delta}, \text{ дБ}, \quad (3.34)$$

где

d – диаметр сердцевины ОВ;

δ – радиальное смещение ОВ;

При угловом смещении дополнительные потери определяются из формулы:

$$A_{\theta}=10\lg \frac{\theta_A}{\theta_A-\theta}, \text{ дБ}, \quad (3.35)$$

где

θ_A – апертурный угол волокна;

θ – угловое смещение ОВ.

Для перерасчета числовой апертуры NA в апертурной угол θ_A приходится находить значения $\arcsin(NA)$. Найти значение $\arcsin x$ можно путем разложения в ряды:

$$\arcsin x=x+\frac{x^3}{2 \cdot 3}+\frac{1 \cdot 3 x^5}{2 \cdot 4 \cdot 5}+\frac{1 \cdot 3 \cdot 5 x^7}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7}+\ldots \quad \left[x^2 < 1\right] .$$

При осевом смещении дополнительные потери определяются из формулы:

$$A_s=10\lg \frac{2 d}{2 d-S \cdot \operatorname{tg} \theta_A}, \text{ дБ},$$

где

θ_A – апертурный угол волокна;

d – диаметр сердцевины ОВ;

S – осевое смещение ОВ.

Приведенные выражения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными, если значения δ, θ и S достаточно малы ($\delta/d \leq 1$, $S/d \leq 1$, $\theta < 10^0$). Наиболее жесткие требования предъявляются при радиальном и угловом смещении. Наличие зазора между торцами волокон существенно меньше влияет на потери.

Варианты задач

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

Задача 2. Определить, какое дополнительное затухание следует ожидать в кварцевом оптическом волокне, если по нему хотят передать сигналы с длинами волн 2, 2,5 и 3 мкм.

Задача 3. Определить, 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: $\Delta=0,0053$, $N_H=100$, $y_H=0,0025\text{мм}$, $E_0=6,9 \cdot 10^8 \frac{H}{\text{м}^2}$, $E_c=6,2 \cdot 10^{10} \frac{H}{\text{м}^2}$.

Задача 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.

Задача 5. При соединении световодного соединительного шнура в кроссовом оптическом шкафу к линейному оптическому кабелю ОКК – 50 – 01 произошло угловое смещение торцов волокна на 3^0 . Определить возникшие при этом дополнительные потери. Параметры оптического волокна: $\Delta=0,01$; $n_1=1,505$.

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

Задача 7. Определить, на сколько изменятся собственные потери в оптическом волокне, если передача сигналов будет осуществляться не в третьем, а во втором окне прозрачности. Параметры оптического волокна: $n_2=1,495$, $\Delta=0,011$, $\text{tg } \delta = 10^{-11}$.

Задача 8. Определить, какое дополнительное затухание следует ожидать в оптических волокнах оптического кабеля типа ОКЛС-01, если по нему хотя бы передать сигналы с длинами волн 1,8, 2,3 и 2,9 мкм.

Задача 9. Определить, 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: $\Delta=0,005$,

$$N_H = 200, y_H = 0,0025\text{мм}, E_0 = 6,9 \cdot 10^8 \frac{H}{\text{м}^2}, E_c = 6,2 \cdot 10^{10} \frac{H}{\text{м}^2}.$$

Задача 10. 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.

Список использованной литературы

1. Иванов С. И., Коршунов В. Н., Ксенофонов С.Н. Сборник упражнений и задач по волоконно-оптическим линиям связи: Учебное пособие/МЭИС.-М., 1987.
2. Справочник. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. /Под редакцией И. И. Гроднева.-М.: Радио и связь, 1993.
3. Горднев И. И., Верник С. М., Кочановский Л.Н. Линии связи.- М.: Радио и связь, 1995.

Контрольное задание №10

Расчет дисперсии в оптических кабелях

Методические указания

Одним из важных явлений процесса распространения импульсных сигналов по оптическим кабелям является дисперсия, рассеяние во время спектральных или модовых составляющих оптического сигнала.

В результате дисперсии импульсный сигнал на вход приемного устройства приходит тем более искаженным, чем длиннее линия (рис. 3.10).

Дисперсия приводит к увеличению длительности импульса (уширение импульса) при прохождении его по оптическому кабелю, появлению межсимвольных помех, и в конечном счете – к ограничению пропускной способности кабеля.

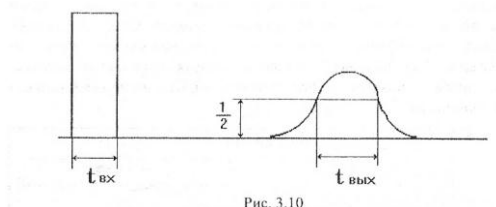


Рис. 3.10

Дисперсионные искажения имеют характер фазовых искажений сигнала и обусловлены различием времени распространения различных мод в световоде и наличием частотной зависимости показателя преломления.

Уширение импульсов возникает не только исключительно при прохождении сигнала через оптическое волокно, но и за счет прохождения сигнала через соединители, модулирующие, демодулирующие и другие устройства. В случае гауссовой формы импульсов все эти приращения длительности сигнала суммируются по квадратному закону:

$$\tau_{\text{ВЫХ}}^2 = \tau_{\text{ВХ}}^2 + \tau_{U1}^2 + \dots + \tau_{Ui}^2 + \dots + \tau_{Un}^2, \quad (3.37)$$

где

$\tau_{\text{ВЫХ}}$ - длительность импульса на выходе фотоприемника;

$\tau_{\text{ВХ}}$ - длительность импульса на входе излучателя;

τ_{Ui} - уширение импульса в i -м элементе тракта.

Как правило, наибольшие искажения в сигнал вносит оптический кабель. Поэтому, согласно (3.37), зная длительность импульсов на входе и выходе тракта, можно рассчитать величину уширения импульсов в оптическом кабеле по формуле (3.10), причем значения $\tau_{\text{ВЫХ}}$ и $\tau_{\text{ВХ}}$ берутся на уровне половины амплитуды импульсов (рис. 3.10).

Лучевая модель иллюстрирующая механизмы возникновения модовой дисперсии в ступенчатых волокнах, показана на рис. 3.13.

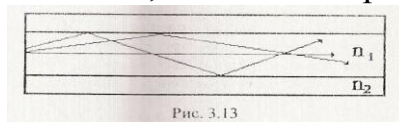


Рис. 3.13

В градиентных волокнах различные лучи также проходят различный путь. Однако их скорость $v=c/n$ различна. Околоосевые лучи распространяются по короткой траектории, однако в среде со сравнительно высоким n , т.е. с малой скоростью, а периферийные лучи – по длинной траектории, но в основном в среде с низким n , т.е. с большой скоростью (рис. 3.14).

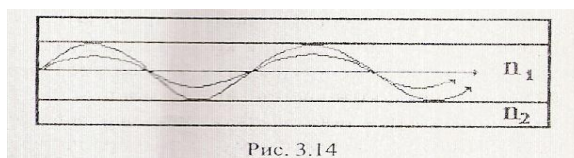


Рис. 3.14

В целом задержка мод оказывается приблизительно одинаковой, а уширение импульсов по сравнению со ступенчатыми волокнами снижается более чем в 10 раз.

Величина модовой дисперсии в градиентных волокнах определяется из выражений (3.13) и (3.14).

Значение ℓ_c в градиентных волокнах составляет порядка 10-15 км.

В табл. 3.4 в качестве примера приведены значения модовой дисперсии $\tau_{\text{мод}}$ в ступенчатых и градиентных волокнах при различных соотношениях показателей преломления сердцевины и оболочки.

Таблица 3.4

Длина линии ℓ , км	Значение $\tau_{\text{мод}}$ нс			
	ступенчатые ОВ		градиентные ОВ	
	Значение Δ			
	0,01	0,006	0,01	0,006
10	498	332	2,47	1,09
20	718	474	3,55	1,58
30	868	578	4,32	1,91

Хроматическая (частотная) дисперсия

Данная дисперсия вызвана наличием спектра частот у источника излучения, характером диаграммы направленности и его некогерентностью. Хроматическая дисперсия, в свою очередь, делится на материальную, волноводную и профильную (для реальных волокон).

Материальная дисперсия

Данная дисперсия объясняется тем, что коэффициент преломления стекла изменяется с длиной волны $n=\varphi(\lambda)$, а практически любой, даже лазерный источник излучения генерирует не на одной длине волны (λ), а в

определенном спектральном диапазоне ($\Delta\lambda$). В результате различные спектральные составляющие передаваемого оптического сигнала имеют различную скорость распространения, что приводит к их различной задержке на выходе волокна.

Из-за узкой полосы излучаемых длин волн у лазерных источников излучения данный вид дисперсии сказывается незначительно. В некогерентных источниках – излучающих светодиодах – полоса пропускания существенно шире, и это дисперсия проявляется довольно значительно. Так основной параметр, который характеризует дисперсию данного вида - $\Delta\lambda/\lambda$ – для лазеров составляет 0.001, а для излучающих светодиодов - 0.1, т.е. на два порядка больше.

Величину уширения импульсов из-за материальной дисперсии τ_{MAT} можно найти из выражения (3.15).

Для инженерных расчетов в первом приближении можно использовать упрощенную формулу, не учитывающую форму профиля показателя преломления (для идеального ступенчатого профиля показателя преломления):

$$\tau_{MAT} = \Delta\lambda \ell M(\lambda) . \quad (3.39)$$

где

$\Delta\lambda$ - ширина спектра излучения источника, обычно соответствует 1-3 нм для лазера и 20-40 нм для светоизлучающих диодов;

$M(\lambda)$ – удельная материальная дисперсия, значения которой затабулированы на (табл.3.5);

ℓ - длина линии.

Удельная материальная дисперсия выражается в пикосекундах на километр длины световода и на нанометр ширины спектра.

Таблица 3. 5

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

С увеличением длины волны значение τ_{MAT} уменьшается, а затем проходит через нуль и приобретает минусовое значение.

Волноводная (внутримодовая) дисперсия

Волноводная дисперсия обусловлена процессами внутри моды. Она характеризуется зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны $\gamma=\psi(\lambda)$. Являясь, составной частью хроматической дисперсии (так же как и материальная дисперсия) , волноводная дисперсия зависит от ширины передаваемого спектра частот.

Величина уширения импульсов из-за волноводной дисперсии τ_{BV} находится из выражения (3.16). Для инженерных расчетов можно использовать упрощенную формулу:

$$\tau_{BV} = \Delta\lambda \ell B(\lambda) , \quad (3.40)$$

где

$B(\lambda)$ – удельная волноводная дисперсия, значения которой затабулированы (табл. 3.6);

$\Delta\lambda$ - ширина спектра излучения источника;

ℓ - длина линии.

Удельная волновожная дисперсия так же, как и удельная материальная дисперсия, выражается в пикосекундах на километр длины световода и на нанометр ширины спектра.

Таблица 3.6

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

Как видно из табл. 3.5 и 3.6 (для ОВ со ступенчатым ППП), вблизи длины волны $\lambda \approx 1,35$ мкм происходит взаимная компенсация материальной и волноводной дисперсии. Из-за этого волна 1,3 мкм получает широкое применение при передаче по одномодовым волокнам, однако по затуханию предпочтительнее волна 1,55 мкм. Поэтому для достижения минимума дисперсии приходится варьировать профилем показателем преломления и диаметром сердечника. При сложном трехслойном профиле показателя преломления можно и на длине волны 1055 мкм получить минимум дисперсионных искажений.

Профильная дисперсия

Данный вид дисперсии проявляется в реальных оптических волокнах, которые могут быть регулярных (например, с регулярной, геликондальной скруткой), нерегулярными (например, нерегулярное изменение границы раздела ППП), неоднородными (например, наличие инородных частиц).

На рис. 3.11 показаны основные принципы возникновения профильной дисперсии. К ним относятся поперечные и продольные малые отклонения (флуктуация) геометрических размеров и формы волокна, например: небольшой эллиптичности поперечного сечения волокна; изменения границы профиля показателя преломления (ППП); осевые и внеосевые провалы ППП, вызванные особенностями технологии изготовления ОВ.

Продольные флуктуации могут возникать в процессе изготовления ОВ и ОК, строительства и эксплуатации ВОЛС. В ряду случаев профильная дисперсия может оказать существенное влияние на общую дисперсию. Профильная дисперсия может проявляться как в многомодовых, так и в одномодовых ОВ. Физически происходит перекачка энергии между направлениями, оболочковыми и излучаемыми волнами (рис 3.8).

Величина уширения импульсов из-за профильной дисперсии $\tau_{\text{пр}}$ находится из выражения (3.17). Это выражение справедливо для одномодовых волокон при реальной флуктуации границы раздела ППП (рис. 3.11). При наличии других внешних влияющих факторов ее величина может значительно увеличиваться.

Для инженерных расчетов можно использовать упрощенную формулу:

$$\tau_{\text{пр}} = \Delta\lambda \ell P(\lambda), \quad (3.41)$$

где

$P(\lambda)$ – удельная профильная дисперсия, значения которой затабулированы (табл. 3.7);

$\Delta\lambda$ - ширина спектра излучения источника;

ℓ - длина линии.

Удельная профильная дисперсия выражается в пикосекундах на километр длины световода и на нанометр ширины спектра.

Таблица 3.7

Длина волны λ , мкм	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,55	1,6	1,8
$P(\lambda)$, пс/(км-нм)	0	1,5	5	2,5	4	5	5,5	6,5	7,5

Сравнивая дисперсионные характеристики различных световодов, можно отметить, что лучшими с этой точки зрения являются одномодовые световоды, где присутствует лишь хроматическая дисперсия, величина которой не превышает нескольких пикосекунд в определенном диапазоне длин волн ($\lambda=1.2 \dots 1,6$ мкм).

Из многомодовых световодов лучшие данные по дисперсии у градиентных световодов с плавным параболическим законом изменения показателя преломления, в которых происходит выравнивание времени растоупанения различных мод и определяющей является материальная дисперсия. По абсолютной величине дисперсия уменьшается с ростом длины волны и колеблется в пределах 1...2 нс/км.

Наиболее сильно дисперсия у ступенчатых многомодовых световодов, что приводит к уменьшению их использования на цифровых высокоскоростных линиях связи.

Результирующее значение уширения импульсов за счет модовой, материальной, волноводной и профильной дисперсии определяется из выражения (3.18).

Дисперсия в основном определяет ширину полосы передаваемых частот и соответственно число каналов передачи информации.

Варианты задач

Задача 1. На межстанционной ВОЛС проложены 2 типа кабелей ОК-50-2 и ОК-50-01. Определить, во сколько раз отличается уширение импульсов в этих кабелях. Длина ВОЛС равна 9 км; $n_1=1,490$, $\Delta n=0,015$.

Задача 2. Определить во сколько раз изменяется величина дисперсии сигнала в ВОЛС, построенной на основе кабеля ОКЛ-01, если заменить источник излучения с лазерного на светодиодный (с $\lambda=0,85$ мкм). Длина ВОЛС равна 63 км.

Задача 3. На межстанционной ВОЛС проложены два типа кабелей ОК-50-1 и ОК-50-02. Определить, во сколько раз отличается уширение импульса в этих кабелях. Длина ВОЛС равна 11 км; $n_2=1,492$, $\Delta n_2=0,01$.

Задача 4. Определить. Во сколько раз изменится величина дисперсии сигнала в ВОЛС, построенной на основе кабеля ОМЗКТ, если заменить источник излучения с лазерного на светодиодный (с $\lambda=0,87$ мкм). Длина ВОЛС равна 48 км.

Список использованной литературы

1. С. И., Коршунов В. Н., Ксенофонтов С.Н. Сборник упражнений и Иванов задач по волоконно-оптическим линиям связи: Учебное пособие/МЭИС.-М., 1987.
2. Справочник. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. /Под редакцией И. И. Гроднева.-М.: Радио и связь, 1993.
3. Горднев И. И., Верник С. М., Кочановский Л.Н. Линии связи.-М.: Радио и связь, 1995.
4. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Связь, 1979.

5. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Защита кабельных линий связи от опасных мешающих влияний. – М.: Связь, 1978.
6. Руководство по защите подземных кабелей связи от ударов молний. – М.: Связь, 1975.
7. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – Радио и связь, 1987.
8. Руководство по защите оптических кабелей от ударов молний. – М., 1996.
9. Руководство по защите металлических кабелей от ударов молний. – М., 1996; проект.
10. Справочник строителя сооружений связи / Д.А. Барон, И.И.Гроднев, В.Н. Евдокимов и др. - М.: Радио и связь, 1988.