

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет информационной безопасности

Кафедра инфокоммуникационных технологий

М. Ю. Дерябина

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ

*Рекомендовано УМО по образованию
в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия
для специальности*

*1-45 01 02 «Инфокоммуникационные системы (по направлениям)»
направления специальности 1-45 01 02-01 «Инфокоммуникационные системы
(стандартизация, сертификация и контроль параметров)»*

Минск БГУИР 2022

УДК 654.1(075.8)
ББК 32.88я73
Д36

Рецензенты:
кафедра управления информационными ресурсами
Института управленческих кадров
Академии управления при Президенте Республики Беларусь
(протокол № 8 от 17.03.2021);

начальник научно-исследовательского отдела
законодательной и теоретической метрологии, научно-технических программ
республиканского унитарного предприятия
«Белорусский государственный институт метрологии»
кандидат технических наук Т. К. Толочко

Дерябина, М. Ю.

Д36 Контроль параметров систем инфокоммуникаций : учеб.-метод. пособие /
М. Ю. Дерябина. – Минск : БГУИР, 2022. – 96 с. : ил.
ISBN 978-985-543-666-0.

Содержит материал для практических занятий по дисциплине «Контроль параметров систем инфокоммуникаций», а также краткие теоретические сведения, методические рекомендации к решению задач и перечень задач/заданий для самостоятельного решения/выполнения.

УДК 654.1(075.8)
ББК 32.88я73

ISBN 978-985-543-666-0

© Дерябина М. Ю., 2022
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Основные параметры и характеристики первичных электрических сигналов	6
1.1 Краткие теоретические сведения.....	6
1.2 Основные рекомендации к решению задач.....	8
1.3 Задачи для самостоятельного решения.....	9
2 Характеристики случайных процессов	12
2.1 Краткие теоретические сведения.....	12
2.2 Основные рекомендации к решению задач.....	14
2.3 Задача для самостоятельного решения.....	14
3 Измерение параметров и характеристик устройств, входящих в состав двустороннего канала связи	18
3.1 Краткие теоретические сведения.....	18
3.2 Основные рекомендации к решению задач.....	23
3.3 Задачи для самостоятельного решения.....	23
4 Преобразование сигналов в устройствах многоканальных систем инфокоммуникаций	26
4.1 Краткие теоретические сведения.....	26
4.2 Основные рекомендации к решению задач.....	29
4.3 Задачи для самостоятельного решения.....	29
5 Характеристики искажений сигналов	31
5.1 Краткие теоретические сведения.....	31
5.2 Основные рекомендации к решению задач.....	33
5.3 Задачи для самостоятельного решения.....	34
6 Контроль параметров линейного тракта многоканальной системы передачи с частотным разделением каналов	35
6.1 Краткие теоретические сведения.....	35
6.2 Основные рекомендации к решению задач.....	37
6.3 Задачи для самостоятельного решения.....	37
7 Аналого-цифровое преобразование сигналов	40
7.1 Краткие теоретические сведения.....	40
7.2 Основные рекомендации к решению задач.....	42
7.3 Задания для самостоятельного выполнения.....	42
8 Измерения в цифровых каналах передачи	44
8.1 Краткие теоретические сведения.....	44
8.2 Основные рекомендации к решению задач.....	48
8.3 Задача для самостоятельного решения.....	48
9 Основные контролируемые параметры сетей телевизионного вещания	50
9.1 Краткие теоретические сведения.....	50
9.2 Основные рекомендации к решению задач.....	53
9.3 Задачи для самостоятельного решения.....	53

10 Основные параметры полного цветового телевизионного сигнала.....	55
10.1 Краткие теоретические сведения.....	55
10.2 Основные рекомендации к решению задач.....	61
10.3 Задача для самостоятельного решения.....	61
11 Системы передачи изображений.....	63
11.1 Краткие теоретические сведения.....	63
11.2 Основные рекомендации к решению задач.....	66
11.3 Задача для самостоятельного решения.....	67
12 Параметры волоконно-оптических систем передачи.	
Оптические стекла.....	69
12.1 Краткие теоретические сведения.....	69
12.2 Основные рекомендации к решению задач.....	73
12.3 Задачи для самостоятельного решения.....	73
13 Параметры волоконно-оптических систем передачи. Затухания в оптических волокнах.....	77
13.1 Краткие теоретические сведения.....	77
13.2 Основные рекомендации к решению задач.....	79
13.3 Задачи для самостоятельного решения.....	79
14 Характеристики сигналов, передаваемых в волоконно-оптических каналах передачи.....	82
14.1 Краткие теоретические сведения.....	82
14.2 Основные рекомендации к решению задач.....	85
14.3 Задачи для самостоятельного решения.....	85
15 Характеристики источников сигналов в волоконно-оптических каналах передачи.....	87
15.1 Краткие теоретические сведения.....	87
15.2 Основные рекомендации к решению задач.....	89
15.3 Задачи для самостоятельного решения.....	89
16 Характеристики приемников сигналов в волоконно-оптических каналах передачи.....	91
16.1 Краткие теоретические сведения.....	91
16.2 Основные рекомендации к решению задач.....	93
16.3 Задачи для самостоятельного решения.....	93
Список использованных источников.....	95

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях средства связи развиваются очень динамично, техника усложняется, поэтому важную роль играют оптимизация работы устройств связи, их настройка, поиск и устранение причин неисправностей.

Для цифровых систем связи характерно то обстоятельство, что ухудшение их параметров долгое время не приводит к ухудшению качества связи, а при достижении определенного порога показатели качества меняются скачкообразно. Современный уровень цифровых систем передачи и коммутации требует узкой специализации измерительной техники для контроля параметров систем инфокоммуникаций.

Наряду с измерительными приборами общего назначения (генераторами, осциллографами, частотомерами) применяются специализированные приборы, такие как анализаторы протоколов сигнализации, анализаторы цифровых систем передачи, измерительные приборы параметров волоконно-оптических линий связи и других параметров.

Кроме того, разрабатываются новые методы и методики измерений и контроля параметров, оценки погрешностей измерения, применения вычислительной техники.

Все это требует глубокого теоретического изучения поставленных проблем, что невозможно без формирования практических навыков анализа и расчета параметров инфокоммуникаций и причин отклонения их от нормированных значений.

Терминология в данном учебно-методическом пособии дается в соответствии с СТБ 1343–2007 «Единая сеть электросвязи Республики Беларусь. Термины и определения» [1].

1 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

1.1 Краткие теоретические сведения

1.1.1 Характеристики периодических сигналов

Измеряемые параметры и характеристики передаваемых радиотехнических сигналов регламентированы ГОСТ 16465–70 «Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения» [2].

Измерительный радиотехнический сигнал – электрическое напряжение или ток, изменяющиеся во времени с заранее известными характеристиками, используемые для измерения параметров радиотехнических цепей и их контроля.

Мгновенное значение сигнала $U(t)$ – значение сигнала в заданный момент времени.

Максимальное значение сигнала U_{\max} – наибольшее мгновенное значение сигнала на протяжении заданного интервала времени.

Минимальное значение сигнала U_{\min} – наименьшее мгновенное значение сигнала на протяжении заданного интервала времени.

Постоянная составляющая сигнала U_0 – среднее значение сигнала.

Переменная составляющая сигнала $U_{\sim}(t)$ – разность между сигналом и его постоянной составляющей.

Пиковое отклонение «вверх» $U_{\text{пик.вв}}$ – наибольшее мгновенное значение переменной составляющей сигнала на протяжении заданного интервала времени.

Пиковое отклонение «вниз» $U_{\text{пик.вн}}$ – наименьшее мгновенное значение переменной составляющей сигнала на протяжении заданного интервала времени, взятое по модулю.

Размах сигнала R – разность между максимальным и минимальным значениями сигнала на протяжении заданного интервала времени.

Средневыпрямленное значение сигнала $U_{\text{св}}$ – среднее значение модуля сигнала.

Среднеквадратическое значение сигнала $U_{\text{ск}}$ – корень квадратный из среднего значения квадрата сигнала.

Средняя мощность сигнала, выделяемая на сопротивлении 1 Ом, $P_{\text{ср}}$ – среднее значение квадрата сигнала.

Энергия сигнала, выделяемая на сопротивлении 1 Ом, $E_{1\text{Ом}}$ – интеграл из квадрата сигнала по всей оси времени.

Спектр сигнала:

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \cos(n\omega t) =$$
$$= U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos(n\omega t + \varphi_n),$$
(1.1)

где A_n, B_n – переменные составляющие синусной и косинусной составляющих спектра соответственно;

$$C_n(\omega) = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \text{ – спектр амплитуд;}$$

$$\varphi_n(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{A_n}{B_n} \text{ – спектр фаз.}$$

1.1.2 Характеристики измерительных импульсов

Изображение прямоугольного импульса представлено на рисунке 1.1.

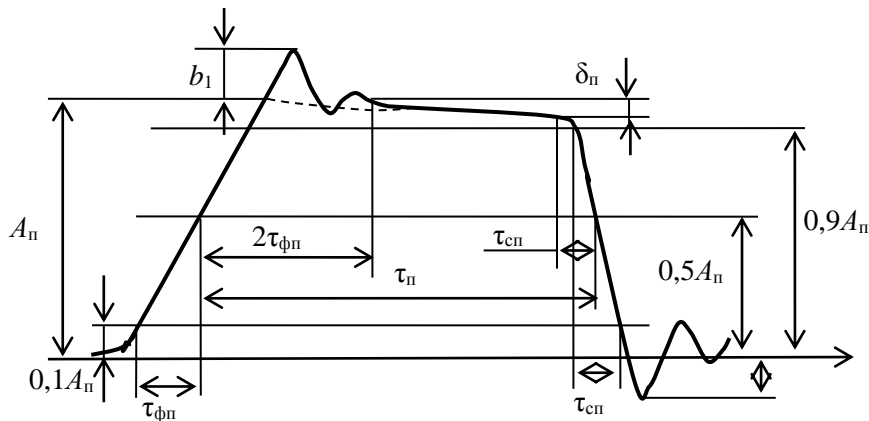


Рисунок 1.1 – Графическое изображение прямоугольного импульса

К основным параметрам прямоугольного импульса относятся:

- $A_{\text{п}}$ – амплитуда импульса;
- $\tau_{\text{п}}$ – длительность импульса – интервал времени, в течение которого мгновенное значение сигнала больше половины амплитуды;
- параметры искажений:
 - а) $\tau_{\text{фп}}$ – длительность фронта;
 - б) $\tau_{\text{срп}}$ – длительность среза;
 - в) b_1 – выброс на вершине импульса;
 - г) b_2 – выброс в паузе импульса;
 - д) $\delta_{\text{п}}$ – неравномерность вершины импульса.

Изображение пилообразного импульса представлено на рисунке 1.2.

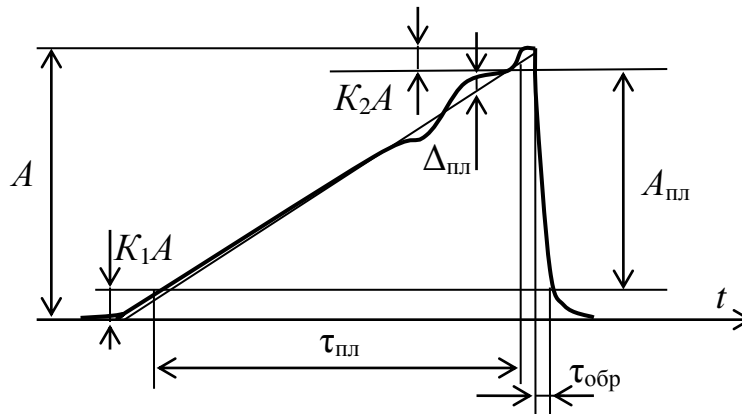


Рисунок 1.2 – Графическое изображение пилообразного импульса

К основным параметрам пилообразного импульса относятся:

- $A_{плл}$ – амплитуда импульса;
- $\tau_{плл}$ – длительность импульса;
- $\tau_{обр}$ – длительность обратного хода импульса;
- $\delta_{плл}$ – нелинейность импульса;
- A – вспомогательная величина, используемая при нормировании;
- $K_1 < 1$; $K_2 < 1$ – заданные коэффициенты.

Спектр непериодических сигналов (в частности, одиночных импульсов) описывается интегралом Фурье:

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega, \quad (1.2)$$

где $S(j\omega)$ – комплексный аналитический спектр сигнала $U(t)$, который может быть представлен в следующем виде: $S(j\omega) = S_1(\omega) + jS_2(\omega)$.

Спектр амплитуд непериодического сигнала (одиночного импульса) $S(\omega)$ определяют по формуле

$$S(\omega) = \sqrt{S_1^2(\omega) + S_2^2(\omega)}, \quad (1.3)$$

а спектр фаз – по формуле

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{S_1(\omega)}{S_2(\omega)}. \quad (1.4)$$

1.2 Основные рекомендации к решению задач

1.2.1 Изучить виды радиотехнических сигналов, применяемых при контроле параметров инфокоммуникационных систем.

1.2.2 Изобразить сигналы и отметить на графиках их параметры.

1.2.3 При решении задач записать математическое выражение оцениваемого параметра и подставить в него численные значения входящих в это выражение величин.

1.3 Задачи для самостоятельного решения

1.3.1 Определить среднеквадратическое, средневыпрямленное, среднее значение, размах и мощность гармонического сигнала, а также записать выражение для комплексного, амплитудного и фазового спектров сигнала. Изобразить сигнала и спектр графически. Параметры сигнала заданы в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры гармонического сигнала

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{\max} , мВ	10	15	20	25	5	3	17	21	13	10
U_{\min} , мВ	2	6	-3	10	-12	-15	6	10	2	7
T , мс	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Продолжение таблицы 1.1

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U_{\max} , мВ	1	10	3	15	55	33	7	1	23	18
U_{\min} , мВ	-20	1	-3	1	12	15	-6	-10	2	7
T , мс	12	13	14	15	6	17	8	9	30	18

Продолжение таблицы 1.1

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
U_{\max} , мВ	20	18	25	15	50	23	11	2	13	20
U_{\min} , мВ	-2	10	1	-1	12	15	2	-10	-2	7
T , мс	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

1.3.2 Изобразить графически прямоугольный импульс с параметрами, заданными в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры прямоугольного импульса

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$A_{п}$, В	10	11	12	13	14	21	22	24	50	35
$\tau_{п}$, с	12	14	25	45	27	18	19	20	34	15
$\tau_{фп}$, мс	140	450	250	120	200	190	180	150	270	340
$\tau_{сп}$, мс	120	430	234	116	198	176	199	140	280	330
b_1 , мВ	340	225	147	389	214	221	560	144	176	189
b_2 , мВ	389	214	221	560	144	176	189	340	225	147
$\delta_{п}$, мВ	234	116	198	176	144	176	189	340	225	147

Продолжение таблицы 1.2

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$A_{п}, В$	22	12	11	35	14	21	10	50	24	13
$\tau_{п}, с$	14	25	27	45	18	12	19	20	34	15
$\tau_{фп}, мс$	150	250	450	220	280	180	100	120	250	240
$\tau_{сп}, мс$	120	430	234	116	198	176	199	140	280	330
$b_1, мВ$	389	214	221	560	144	176	189	340	225	147
$b_2, мВ$	340	225	147	389	214	221	560	144	176	189
$\delta_{п}, мВ$	198	116	147	176	144	234	189	340	225	176

Продолжение таблицы 1.2

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$A_{п}, В$	20	21	22	33	34	31	42	44	40	55
$\tau_{п}, с$	18	18	20	40	25	13	17	22	39	45
$\tau_{фп}, мс$	400	354	350	220	280	290	380	550	470	140
$\tau_{сп}, мс$	420	330	334	216	298	276	399	540	480	130
$b_1, мВ$	140	125	147	189	114	121	160	144	176	189
$b_2, мВ$	289	214	221	260	244	276	289	240	225	247
$\delta_{п}, мВ$	134	316	398	376	244	276	289	340	325	347

1.3.3 Изобразить графически пилообразный импульс с параметрами, заданными в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Параметры пилообразного импульса

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$A_{пл}, В$	200	210	190	160	130	310	620	140	200	350
$\tau_{пл}, с$	22	24	75	55	97	28	29	50	64	65
$\tau_{обр}, мс$	240	150	650	120	100	120	140	110	170	140
$\delta_{пл}, мВ$	200	416	298	186	184	146	289	240	525	647

Продолжение таблицы 1.3

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$A_{пл}, В$	100	110	120	130	140	210	220	240	500	350
$\tau_{пл}, с$	12	14	25	45	27	18	19	20	34	15
$\tau_{обр}, мс$	140	450	250	120	200	190	180	150	270	340
$\delta_{пл}, мВ$	234	116	198	176	144	176	189	340	225	147

Продолжение таблицы 1.3

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$A_{пл}, В$	210	220	240	500	350	100	110	120	130	140
$\tau_{пл}, с$	19	20	34	15	12	14	25	45	27	18
$\tau_{обр}, мс$	120	200	180	150	270	190	340	140	450	250
$\delta_{пл}, мВ$	189	176	144	176	340	147	234	116	198	225

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

2.1 Краткие теоретические сведения

Характеристики случайных сигналов и их взаимосвязи регламентированы ГОСТ 16465–70 «Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения» [2].

Процесс – это функция, аргументом которой является время.

Процесс $X^*(t)$, для которого изменение его ординаты во времени происходит случайным образом, называют *случайным*, или *стохастическим*.

У случайного процесса функция $X^*(t)$ в каждый момент времени является случайной величиной, подчиняющейся закону распределения $F(x, t)$. При этом функция $X^*(t)$, описывающая случайный процесс в каждый момент времени, считается заданной на интервале $(t, t + \tau)$, если известен многомерный закон распределения $F(x_1, x_2, \dots, x_n, t_1, t_2, \dots, t_n)$ во всех точках данного интервала $(t, t + \tau)$.

Конкретная зависимость величины от времени называется **реализацией процесса** и является детерминированной функцией.

По характеру изменения ординаты случайные процессы могут быть *непрерывными* или *дискретными*.

По характеру изменения во времени вероятностных свойств случайные процессы могут быть *стационарными* и *нестационарными*.

У стационарного процесса функция распределения вероятностей неизменна (инвариантна) во времени. Иными словами, если в этой функции заменить аргумент t аргументом $t + \tau$, где τ – произвольный интервал времени, характер зависимости не изменится.

Многие стационарные процессы обладают **эргодическим свойством**, заключающимся в том, что вероятностные характеристики таких процессов могут быть получены в результате усреднения во времени одной реализации достаточно большой длительности T вместо усреднения по ансамблю.

Ниже перечислены функции, которые характеризуют случайные процессы.

1 Функция распределения вероятностей $F(x, t)$ непрерывного одномерного процесса $X^*(t)$ – вероятность того, что в данный момент времени любое значение случайного процесса меньше некоторого значения x :

$$F(x, t) = P\{X^*(t) < x\}. \quad (2.1)$$

Данная функция устанавливает связь между возможными значениями случайной величины и вероятностями их появления при многократных реализациях процесса.

2 Плотность распределения вероятностей $p(x, t)$ (для непрерывных случайных процессов) – производная от функции распределения:

$$p(x, t) = \frac{\partial F(x, t)}{\partial x}. \quad (2.2)$$

3 Математическое ожидание случайной величины $m_x(t)$:

$$m_x(t) = M[X^*(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot p(x, t) dx. \quad (2.3)$$

4 **Дисперсия** $D_x(t)$ – рассеяние значений реализаций случайного процесса относительно среднего значения:

$$D_x(t) = D[X^*(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - m_x(t)]^2 p(x, t) dx. \quad (2.4)$$

Для стационарного эргодического процесса дисперсия является постоянной величиной, а ее оценка может быть определена по формуле

$$D_x = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{x}^2(t) dt, \quad (2.5)$$

где $\dot{x}(t)$ – центрированная реализация случайного процесса $X^*(t)$.

Математическое ожидание и дисперсия отражают отдельные частные свойства случайного процесса.

5 **Среднеквадратическое значение** $x_{\text{ск}}$ (среднее квадратическое отклонение стационарного случайного процесса):

$$x_{\text{ск}} = \sqrt{x^2(t)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}. \quad (2.6)$$

Среднеквадратическое значение дает представление об интенсивности процесса, а среднее квадратическое отклонение – о степени его флуктуаций.

6 **Одномерная плотность вероятности** $p_1(x)$ – функция, равная пределу отношения вероятности пребывания случайного сигнала в некотором интервале значений к ширине этого интервала при стремлении его к нулю, причем ее аргументом является значение, к которому стягивается интервал:

$$p_1(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P\left[x - \frac{\Delta x}{2} \leq x(t) \leq x + \frac{\Delta x}{2}\right]}{\Delta x}, \quad (2.7)$$

где P – вероятность;

Δx – ширина интервала.

Одномерная плотность вероятности характеризует распределение значений процесса в фиксированных точках.

7 **Корреляционная функция** $R(\tau)$ – функция, равная среднему значению произведения переменной составляющей случайного сигнала $\tilde{x}(t)$ к такой же переменной составляющей, но запаздывающей на заданное время $\tilde{x}(t + \tau)$:

$$R(\tau) = \overline{\tilde{x}(t) \cdot \tilde{x}(t + \tau)}, \quad (2.8)$$

где τ – время запаздывания.

Корреляционная функция характеризует статистическую связь между мгновенными значениями случайного сигнала, разделенными заданным интервалом времени, и содержит информацию о процессе во временной области.

8 Нормированная корреляционная функция $r(\tau)$ – функция, равная отношению корреляционной функции случайного сигнала к его дисперсии:

$$r(\tau) = \frac{R(\tau)}{D_x(t)}. \quad (2.9)$$

Нормированная корреляционная функция содержит информацию о процессе в частотной области.

9 Энергетический спектр $W(\omega)$ – функция, представляющая собой преобразование Фурье от корреляционной функции, аргументом которой является частота:

$$W(\omega) = 4 \cdot \int_0^{\infty} R(\tau) \cdot \cos \omega \cdot \tau d\tau. \quad (2.10)$$

10 Взаимная корреляционная функция $R_{x_1, x_2}(\tau)$ – функция, равная среднему значению произведения переменной составляющей одного случайного сигнала и запаздывающей на заданное время переменной составляющей другого случайного сигнала:

$$R_{x_1, x_2}(\tau) = \overline{x_1(t) \cdot x_2(t - \tau)}. \quad (2.11)$$

Взаимная корреляционная функция характеризует статистическую связь между мгновенными значениями двух случайных сигналов, разделенных заданным интервалом времени.

11 Взаимный энергетический спектр $W_{x_1, x_2}(\omega)$ – функция, представляющая собой преобразование Фурье от взаимной корреляционной функции, аргументом которой является частота:

$$W_{x_1, x_2}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{x_1, x_2}(\tau) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot \tau} d\tau. \quad (2.12)$$

Последние пять выражений характеризуют взаимосвязь сигналов.

2.2 Основные рекомендации к решению задач

2.2.1 Изучить характеристики случайных процессов и сигналов, применяемых при контроле параметров инфокоммуникационных систем.

2.2.2 Усвоить физический смысл контролируемых параметров сигналов.

2.2.3 При решении задач записать аналитическое выражение оцениваемой характеристики и подставить в него численные значения входящих в это выражение величин.

2.3 Задача для самостоятельного решения

Плотность распределения вероятностей случайного эргодического процесса $X^*(t)$ описывается математическим выражением

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x(t)}} e^{-\frac{[x-m_x(t)]^2}{2D_x(t)}}. \quad (2.13)$$

Доверительная вероятность данного процесса описывается выражением

$$P(x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x(t)}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{[x-m_x(t)]^2}{2D_x(t)}} dx, \quad (2.14)$$

где x_1 и x_2 – нижняя и верхняя границы интервала изменения переменных соответственно.

Для стационарного случайного процесса нормированная корреляционная функция определяется по формуле

$$r_x(\tau) = \frac{R_x(\tau)}{D_x(t)}. \quad (2.15)$$

Для двух стационарных случайных процессов нормированная корреляционная функция определяется по формуле

$$r_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{D_x(t) \cdot D_y(t)}. \quad (2.16)$$

Определить математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию и нормированную корреляционную функцию рассматриваемого процесса. Изобразить на графике область процесса $X^*(t)$.

Значения x заданы в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики случайного эргодического процесса

Номер точки	Вариант				
	1	2	3	4	5
1	16,0065	86,0065	11,2345	35,5765	58,0065
2	16,0154	86,0154	12,4894	34,5654	58,0154
3	15,5878	84,5878	12,9605	35,5878	59,5878
4	15,1454	85,1454	12,7684	35,1454	59,1454
5	16,1341	85,1341	11,5679	35,1341	58,1341
6	16,8065	85,8065	11,8134	34,1065	59,8065
7	15,0154	87,0154	12,1564	34,8154	59,0154
8	15,1587	86,1587	12,3750	35,3587	56,1587
9	15,9145	86,9145	11,6783	35,0145	58,9145
10	16,8134	85,8134	12,5672	35,5734	58,8134

Продолжение таблицы 2.1

Номер точки	Вариант				
	6	7	8	9	10
1	26,9065	6,0065	44,1345	31,5765	158,006
2	26,8154	6,0154	44,1894	32,5654	158,015

Продолжение таблицы 2.1

Номер точки	Вариант				
	6	7	8	9	10
3	25,6878	4,5878	45,3605	31,5878	159,587
4	25,5454	5,1454	45,9645	31,1454	159,145
5	26,4441	5,1341	45,5979	31,1341	158,134
6	26,6065	5,8065	45,2334	32,1065	159,806
7	25,0554	7,0154	44,7564	32,8154	159,0123
8	25,1697	6,1587	45,3950	32,3587	156,1585
9	25,9146	6,9145	44,6783	32,0145	158,9147
10	26,8554	5,8134	44,9872	32,1734	158,8138

Продолжение таблицы 2.1

Номер точки	Вариант				
	11	12	13	14	15
1	15,8065	86,8065	12,3564	35,8065	58,8065
2	15,9154	85,9154	11,4564	35,9154	58,9154
3	15,1878	85,1878	12,5678	35,6778	58,1878
4	16,1984	86,1984	12,3567	34,8684	59,1984
5	16,2343	86,2343	11,8393	35,2343	59,2343
6	16,8165	86,8165	12,2453	35,8165	59,8165
7	15,9154	85,9154	11,3567	35,9154	58,9154
8	16,7887	86,7887	12,6734	36,0087	59,7887
9	15,5148	85,5148	12,5148	35,5148	58,5148
10	16,8134	86,8134	12,8134	36,0000	58,8134

Продолжение таблицы 2.1

Номер точки	Вариант				
	16	17	18	19	20
1	25,8665	6,8065	44,3364	31,8065	158,8065
2	25,9654	5,9154	45,6564	31,9154	158,9153
3	25,6878	5,1878	45,1678	32,6778	158,1878
4	26,8984	6,1984	45,2567	32,8682	159,1985
5	26,4343	6,2343	45,7393	31,2343	159,2348
6	26,7165	6,8165	44,3653	31,8165	159,8169
7	25,2152	5,9154	44,9567	32,9154	158,9150
8	26,5887	6,7887	44,3934	32,0087	159,7884
9	25,7148	5,5148	45,1148	32,5148	158,5146
10	26,8134	6,8134	45,7134	32,0000	158,8132

Продолжение таблицы 2.1

Номер точки	Номер варианта				
	21	22	23	24	25
1	16,1341	86,1341	12,1341	35,0841	58,1341
2	16,1675	86,1675	11,8675	34,1675	58,1675
3	15,9154	85,9154	11,9876	34,9154	58,9154
4	16,1387	86,1387	12,5678	34,1387	59,1387
5	15,6745	85,6745	12,5672	35,6745	58,6745
6	16,0174	86,0174	11,3859	36,0074	58,0174
7	16,8045	86,8045	11,4676	35,8045	59,8045
8	15,8154	85,8154	12,5673	35,8154	58,8154
9	16,1878	86,1878	12,5568	34,8718	59,1878
10	16,1884	86,1884	12,4789	35,1884	58,1884

Продолжение таблицы 2.1

Номер точки	Номер варианта				
	26	27	28	29	30
1	10,1341	6,1341	72,1341	55,0841	28,1341
2	10,1675	6,1675	71,8675	54,1675	28,1675
3	11,9154	5,9154	71,9876	54,9154	28,9154
4	11,1387	6,1387	72,5678	54,1387	29,1387
5	11,6745	5,6745	72,5672	55,6745	28,6745
6	10,0174	6,0174	71,3859	56,0074	28,0174
7	10,8045	6,8045	71,4676	55,8045	29,8045
8	11,8154	5,8154	72,5673	55,8154	28,8154
9	11,1878	6,1878	72,5568	54,8718	29,1878
10	10,1884	6,1884	72,4789	55,1884	28,1884

3 ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ДВУСТОРОННЕГО КАНАЛА СВЯЗИ

3.1 Краткие теоретические сведения

Простейшим способом организации двустороннего канала связи является использование двух типовых односторонних каналов связи; при этом можно использовать однополосную четырехпроводную систему, работающую в полосе частот от f_1 до f_2 .

Двусторонняя связь при использовании двухпроводной линии реализуется в двух диапазонах частот: $f_1 - f_2$ (от абонента А к абоненту Б) и $f_3 - f_4$ (от абонента Б к абоненту А). В этом случае наряду с развязывающими устройствами необходимо использовать устройства для преобразования исходного сигнала в полосу частот соответствующего направления тракта передачи и обратного преобразования в тракте приема: фильтры нижних и верхних частот (ФНЧ и ФВЧ).

В передатчике станции А первичный сигнал в полосе частот $F_1 - F_2$ с помощью ФНЧ преобразуется в линейный спектр $f_1 - f_2$ и передается к станции Б по двухпроводной линии. Далее сигнал, поступивший на станцию Б, с помощью аналогичного ФНЧ преобразуется в тональный спектр с полосой частот $F_1 - F_2$, после чего через развязывающее устройство РУ-2 поступает в двухпроводной тракт телефонной сети. В обратном направлении, от станции Б к станции А, сигнал преобразуется аналогичным образом, только с помощью ФВЧ спектр первичного сигнала преобразуется в линейный спектр с полосой частот $f_3 - f_4$.

Характеристики ослабления направляющих ФВЧ и ФНЧ в полосе пропускания и заграждения приведены на рисунке 3.1.

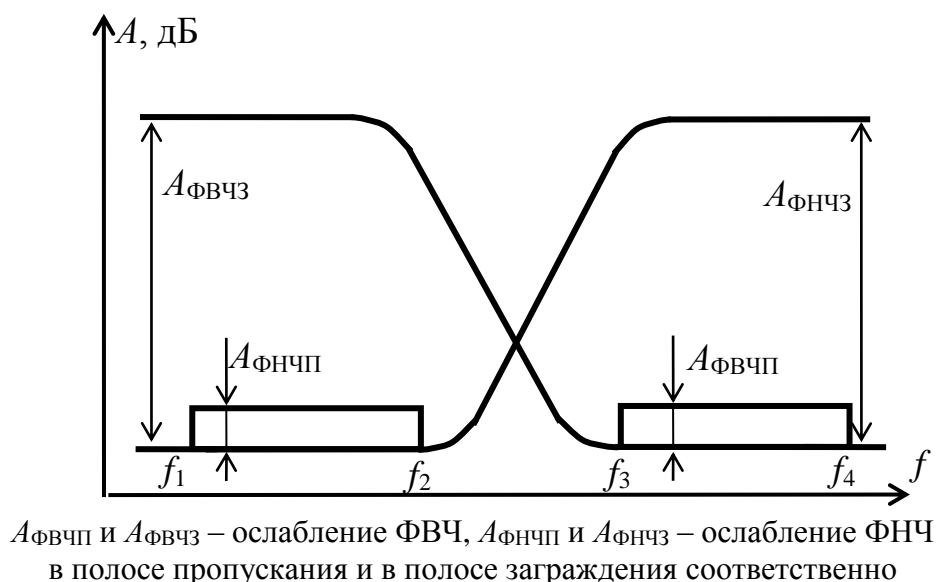


Рисунок 3.1 – Характеристики ослабления направляющих фильтров верхних и нижних частот

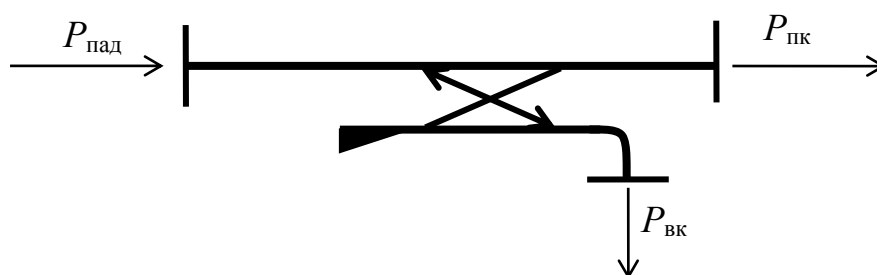
При подключении абонентов к двухпроводной линии используются развязывающие устройства, отклонение параметров которых от номинальных оказывает влияние на качество связи. В данном случае развязывающие устройства предназначены для разделения направлений передачи и приема.

Пути передачи сигналов от абонента к абоненту называются **направлениями пропускания** и характеризуются минимально возможным затуханием (ослаблением). Путь передачи сигнала между двумя направлениями пропускания называется **направлением развязки** и характеризуется максимально возможным затуханием. Кроме того, развязывающие устройства должны обеспечить согласование при подключении нагрузок, не вносить искажений при передаче сигналов в направлении пропускания (развязки), иметь высокую надежность и малые габариты.

Наиболее часто применяются следующие развязывающие устройства:

- направленные ответвители;
- аттенюаторы;
- циркуляторы;
- мосты.

Структурная схема простейшего направленного ответвителя представлена на рисунке 3.2.



$P_{пад}$ – падающая мощность; $P_{пк}$ – мощность, прошедшая в первичном канале;
 $P_{вк}$ – мощность, прошедшая во вторичном канале

Рисунок 3.2 – Обобщенная структурная схема направленного ответвителя

Направленные ответвители в зависимости от диапазона частот передаваемого сигнала могут быть выполнены в коаксиальном, волноводном и полосковом вариантах.

Основными характеристиками направленных ответвителей являются ослабление, развязка и направленность.

Ослабление направленного ответвителя $A_{но}$ – отношение мощности, прошедшей в первичном канале, к падающей мощности:

$$A_{но} = 10 \lg \frac{P_{пк}}{P_{пад}}. \quad (3.1)$$

Направленность направленного ответвителя $N_{но}$ – отношение мощности, прошедшей во вторичном канале, к падающей мощности:

$$N_{\text{но}} = 10 \lg \frac{P_{\text{вк}}}{P_{\text{пад}}}. \quad (3.2)$$

Развязка $R_{\text{но}}$ – отношение мощностей в первичном и вторичном каналах направленного ответвителя:

$$R_{\text{но}} = 10 \lg \frac{P_{\text{пк}}}{P_{\text{вк}}}. \quad (3.3)$$

Большое влияние на качество передачи сигнала оказывают характеристики согласования.

Линия передачи считается согласованной с источником сигнала, если от источника в линию поступает наибольшая возможная мощность (за исключением энергии потерь). Это условие выполняется, если внутреннее сопротивление источника сигнала равно входному сопротивлению линии [3].

Линия передачи обычно имеет неоднородности в виде соединительных и переходных устройств, сочленений и т. п., от которых возникают вторичные отраженные волны. В результате в линии передачи устанавливается смешанный режим, приводящий к зависимости входного сопротивления линии от частоты, уменьшению мощности, которую может передать линия без пробоя (поскольку в линии не соблюдается режим бегущей волны). Уменьшается также коэффициент полезного действия системы передачи. Кроме того, длина линии должна быть вполне определенной, чтобы обеспечивать на входе нужное для источника сигнала сопротивление нагрузки, что вызывает затруднения при ее изготовлении (необходимо выдерживать жесткие допуски или подбирать длину линии в каждом конкретном случае).

Наилучшие параметры системы по согласованию получаются в том случае, когда источник и нагрузка конструируются так, чтобы активная составляющая их сопротивления в заданном диапазоне частот была близка к волновому сопротивлению линии передачи, а реактивная составляющая – мала по сравнению с активной. На практике такое согласование часто не имеет места, поэтому требуется применение согласующих устройств, обеспечивающих минимум отражений.

Типы согласующих устройств зависят от метода согласования. Например, это может быть вентиль, который будет либо поглощать отраженную волну, либо отводить ее в специальную поглощающую нагрузку. Так реализуется метод поглощения отраженной волны.

Можно в линию передачи ввести одну или несколько дополнительных неоднородностей, создающих дополнительную отраженную волну, равную по амплитуде и противоположную по фазе имеющейся в линии отраженной волне (метод компенсирующих неоднородностей). При этом две волны взаимно уничтожат друг друга. Однако этот метод обеспечивает согласование только на фиксированной частоте или в узком диапазоне частот.

Третьим способом обеспечения согласования в линии передачи является так называемый метод переходов, когда применяются неоднородные линии, плавно или скачками изменяющие от сечения к сечению свои параметры. Этот

метод может обеспечить согласование в широкой полосе частот, и чем длиннее переход, тем шире полоса частот, в которой обеспечивается согласование. Однако данный метод имеет следующий недостаток: он не компенсирует имеющуюся в нагрузке реактивность. В связи с этим данный метод применяется для согласования нагрузок с малой величиной реактивной составляющей полного сопротивления.

Волновым сопротивлением линии передачи Z называется отношение напряжения между проводниками к току в одном из них в режиме бегущей волны. Например, для прямоугольного волновода с рабочей волной типа H_{10} величина удельного волнового сопротивления (или поперечного волнового сопротивления по полю) может быть определена по формуле

$$Z = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} = \frac{\Lambda}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}, \quad (3.4)$$

где μ – магнитная проницаемость среды;

ε – диэлектрическая проницаемость среды;

λ_0 – длина волны в свободном пространстве;

a – размер широкой стенки волноводного канала;

Λ – длина волны в волноводе, определяемая как

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}. \quad (3.5)$$

Например, в прямоугольном волноводе может быть использовано согласующее устройство в виде отрезка волновода с меньшими, чем у основного волновода, размерами узкой и широкой стенок. Тогда перепад волновых сопротивлений с основного волновода будет рассчитываться по формуле

$$\frac{Z_{\text{п}}}{Z} = \frac{b_{\text{п}} \cdot a}{a_{\text{п}} \cdot b} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{2a_{\text{п}}}\right)^2}} = \frac{b_{\text{п}} \cdot a}{a_{\text{п}} \cdot b} \cdot \frac{\Lambda_{\text{п}}}{\Lambda}, \quad (3.6)$$

где $a_{\text{п}}$, $b_{\text{п}}$ – длины широкой и узкой стенок перехода соответственно;

$\Lambda_{\text{п}}$ – длина волны в волноводе в переходе.

Для широкополосного согласования двух линий передачи с разными волновыми сопротивлениями применяются ступенчатые переходы – каскадные соединения некоторого количества отрезков передающих линий (ступенек), имеющих одинаковую длину и различные волновые сопротивления. Число ступенек в переходе на единицу меньше числа скачков волнового сопротивления [3].

Предполагается, что ступенька не имеет активных потерь, поскольку ее длина, как правило, не превышает нескольких длин волн.

Геометрические размеры каждой ступеньки (ширина канала a_i и длина ступеньки l_i) определяются соотношениями

$$a_i = \frac{a}{Z_i} \cdot \sqrt{1 + (Z_i^2 - 1) \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{ср}}}{2a}\right)^2} \quad \text{и} \quad (3.7)$$

$$l_i = \frac{\Lambda_i}{4} = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{4 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{ср}}}{2a}\right)^2}}, \quad (3.8)$$

где Z_i – приведенное волновое сопротивление линии, определяемой как отношение волнового сопротивления линии ρ_i к волновому сопротивлению левой подводящей линии ρ_0 ($Z = \rho_i / \rho_0$);

$\lambda_{\text{ср}}$ – средняя длина рабочего диапазона, определяемая по формуле

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{min}} + \lambda_{\text{max}}}{2}. \quad (3.9)$$

Тогда количество переходов n равно

$$n = \frac{\text{arch} \frac{R-1}{2h\sqrt{R}}}{\text{arch} \frac{1}{S}}, \quad (3.10)$$

где R – перепад волнового сопротивления ($R = Z / \rho_0$);

S – масштабный множитель, определяемый полосой пропускания линии.

Общая длина перехода l составит

$$l = \sum_{i=1}^n l_i. \quad (3.11)$$

Затухание между микрофоном одного абонента и телефоном другого абонента будет определяться затуханием направляющего ФВЧ в полосе заграждения f_1-f_2 $A_{\text{ФВЧЗ}}$, затуханием ФНЧ в полосе заграждения f_3-f_4 $A_{\text{ФНЧЗ}}$, максимально допустимым ослаблением ФВЧ в полосе пропускания f_3-f_4 $A_{\text{ФВЧП}}$, затуханием ФНЧ в полосе пропускания f_1-f_2 $A_{\text{ФНЧП}}$, а также затуханием развязывающих устройств и линии передачи.

Общее затухание в линии будет определяться следующим выражением:

$$A = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}, \quad (3.12)$$

где P_1 и P_2 – мощности сигнала на входе и выходе устройства (тракта передачи) соответственно.

Эти же параметры будут определять и дальность связи в соответствии со следующим выражением:

$$L = \frac{A_{\text{MT}}}{A}, \quad (3.13)$$

где A_{MT} – допустимое затухание между микрофоном абонента А и телефоном абонента Б, дБ;

A – затухание в линии, дБ/км.

Для передачи сигнала на дальние расстояния необходимы усилители, равномерно размещаемые вдоль магистрали и обеспечивающие усиление сигналов в двух направлениях передачи.

3.2 Основные рекомендации к решению задач

3.2.1 Изучить основные параметры и характеристики устройств, входящих в состав двустороннего канала связи, и их влияние на качество связи.

3.2.2 Усвоить физический смысл контролируемых параметров развязывающих устройств, входящих в состав канала связи.

3.2.3 При решении задач составить структурную схему устройства (канала связи), записать аналитическое выражение контролируемого параметра и подставить в него численные значения входящих в это выражение величин.

3.3 Задачи для самостоятельного решения

3.3.1 Определить ослабление, направленность и развязку направленного ответвителя. Значения мощностей на входах и выходах направленного ответвителя заданы в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения мощностей на входах и выходах направленного ответвителя

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{\text{пад}}$, мВт	2,0	2,2	2,6	2,8	2,7	2,6	2,0	2,2	2,5	1,9
$P_{\text{ПК}}$, мВт	1,5	1,8	2,0	2,5	1,8	2,0	1,9	1,7	2,2	1,5
$P_{\text{ВК}}$, мкВт	1,8	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	2,2	2,5	2,0	1,5

Продолжение таблицы 3.1

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_{\text{пад}}$, мВт	1,5	1,1	1,1	1,6	2,1	2,3	1,9	2,4	1,9	1,0
$P_{\text{ПК}}$, мВт	1,8	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	2,2	2,5	2,0	1,5
$P_{\text{ВК}}$, мкВт	1,1	1,1	1,3	1,9	2,4	1,1	2,1	1,6	1,8	1,3

Продолжение таблицы 3.1

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$P_{\text{пад}}$, мВт	1,8	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	2,2	2,5	2,0	1,5
$P_{\text{ПК}}$, мВт	1,1	1,1	1,3	1,9	2,4	1,1	2,1	1,6	1,8	1,3
$P_{\text{БК}}$, мкВт	1,5	1,1	1,1	1,6	2,1	2,3	1,9	2,4	1,9	1,0

3.3.2 На выходе типового микрофона телефонного аппарата средняя мощность первичного сигнала равна P_1 (мВт), мощность сигнала на входе телефона, соответствующая его нормальному восприятию, равна P_2 (мкВт). Рассчитать допустимое затухание между микрофоном одного абонента и телефоном другого абонента, а также непосредственную дальность связи. Определить, какие элементы канала связи будут оказывать существенное влияние на величину затухания в канале. Значения P_1 и P_2 заданы в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения мощностей сигналов

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_1 , мВт	1,8	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	2,2	2,5	2,0	1,5
P_2 , мкВт	1,5	1,1	1,1	1,6	2,1	2,3	1,9	2,4	1,9	1,0

Продолжение таблицы 3.2

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P_1 , мВт	1,8	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	2,2	2,5	2,0	1,5
P_2 , мкВт	1,1	1,1	1,3	1,9	2,4	1,1	2,1	1,6	1,8	1,3

Продолжение таблицы 3.2

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
P_1 , мВт	1,5	2,0	2,2	2,0	2,8	2,5	2,2	2,7	2,3	1,8
P_2 , мкВт	1,1	1,1	1,6	1,6	2,1	2,3	1,9	2,4	1,9	1,0

3.3.3 Рассчитать, какое ослабление вносит в линию передачи согласующий ступенчатый переход, состоящий из четырех ступенек длинами l_1, l_2, l_3, l_4 , если на вход перехода подается сигнал мощностью P_1 , а мощность сигнала на выходе каждой ступеньки равна P_2 (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Параметры ступенчатого перехода

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_1 , мВт	1,8	1,5	1,5	2,1	2,5	3,0	2,2	2,5	2,0	1,5
P_2 , мВт	1,5	1,1	1,1	1,6	2,1	2,3	1,9	2,4	1,9	1,0
l_1 , мм	5,0	4,5	5,5	6,5	5,1	4,1	4,7	4,3	5,3	4,3
l_2 , мм	4,2	4,2	5,2	6,0	4,5	4,0	4,2	4,1	4,9	4,0
l_3 , мм	3,8	3,7	4,7	5,7	4,0	3,9	3,3	3,8	4,5	3,5
l_4 , мм	3,3	3,1	4,0	5,0	3,7	3,7	3,6	3,5	4,2	3,1

Продолжение таблицы 3.3

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P_1 , мВт	1,8	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	2,2	2,5	2,0	1,5
P_2 , мВт	1,5	1,1	1,1	1,6	2,1	2,3	1,9	2,4	1,9	1,0
l_1 , мм	6,5	5,3	5,0	4,1	4,7	5,5	5,1	4,3	4,3	4,5
l_2 , мм	6,0	4,9	4,2	4,0	4,2	5,2	4,5	4,0	4,1	4,2
l_3 , мм	5,7	4,5	3,8	3,9	3,3	4,7	4,0	3,5	3,8	3,7
l_4 , мм	5,0	4,2	3,3	3,7	3,6	4,0	3,7	3,1	3,5	3,1

Продолжение таблицы 3.3

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
P_1 , мВт	1,8	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	2,2	2,5	2,0	1,5
P_2 , мВт	1,5	1,1	1,1	1,6	2,1	2,3	1,9	2,4	1,9	1,0
l_1 , мм	4,5	5,1	4,1	4,3	5,5	5,3	5,0	4,3	4,7	6,5
l_2 , мм	4,2	4,5	4,0	4,0	5,2	4,9	4,2	4,1	4,2	6,0
l_3 , мм	3,7	4,0	3,9	3,5	4,7	4,5	3,8	3,8	3,3	5,7
l_4 , мм	3,1	3,7	3,7	3,1	4,0	4,2	3,3	3,5	3,6	5,0

4 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ В УСТРОЙСТВАХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ

4.1 Краткие теоретические сведения

Для передачи информации с помощью электромагнитных волн радио- и оптического диапазонов применяется **модуляция сигнала**.

Модуляцией называется изменение одной либо нескольких характеристик высокочастотного колебания по закону низкочастотного (модулирующего) сигнала.

Переносчиком сигнала является колебание высокой частоты, а передаваемым сигналом – колебание низкой частоты, которое может быть гармоническим, пилообразным, импульсным.

Чаще всего при передаче информации используют амплитудную, фазовую, частотную или смешанную (например, амплитудно-фазовую) модуляцию. Модуляция колебаний применяется для передачи информации с помощью электромагнитных волн радио- и оптического диапазонов. Переносчиком сигнала являются синусоидальные колебания высокой частоты, а их параметры модулируются низкочастотным передаваемым сигналом.

Характеристики взаимодействия сигналов установлены ГОСТ 16465–70 «Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения» [2].

При амплитудной модуляции высокочастотного несущего сигнала частотой ω синусоидальным сигналом частотой Ω выражение для модулированного колебания $U_x(t)$ (рисунок 4.1) может быть записано в следующем виде:

$$U_x(t) = U_{\max} \cdot (1 + m \cdot \sin\Omega t) \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (4.1)$$

где U_{\max} – максимальное значение модулирующего колебания;

m – глубина модуляции.

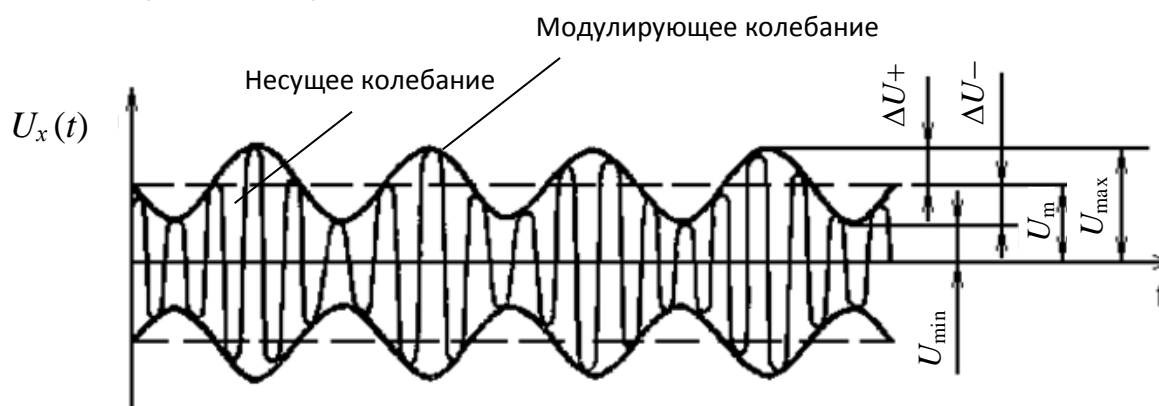


Рисунок 4.1 – Амплитудно-модулированный сигнал

Глубина модуляции m характеризует изменение амплитуды несущего колебания и определяется следующим выражением:

$$m = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} = \frac{\Delta U}{U_m}, \quad (4.2)$$

где ΔU – изменение амплитуды модулированного сигнала;

U_m – среднее за период значение модулирующего сигнала.

Выражение (4.2) справедливо только при симметричной модуляции, т. е. когда $\Delta U_+ = \Delta U_-$. При несимметричной модуляции различают значения глубины модуляции m , которые устанавливаются раздельно: «вверх» – $m_{\text{вв}}$ и «вниз» – $m_{\text{вн}}$:

$$m_{\text{вв}} = \frac{\Delta U_+}{U_m}, \quad m_{\text{вн}} = \frac{\Delta U_-}{U_m}, \quad (4.3)$$

где ΔU_+ и ΔU_- – пиковые отклонения «вверх» и «вниз» модулирующего сигнала.

Коэффициент модуляции «вверх» – коэффициент, равный отношению пикового отклонения «вверх» закона модуляции к его постоянной составляющей при амплитудной модуляции [2].

Коэффициент модуляции «вниз» – коэффициент, равный отношению пикового отклонения «вниз» закона модуляции к его постоянной составляющей при амплитудной модуляции [2].

Частота модуляции Ω характеризует скорость изменения амплитуды колебаний.

При частотной модуляции изменяется частота несущего колебания (рисунок 4.2).

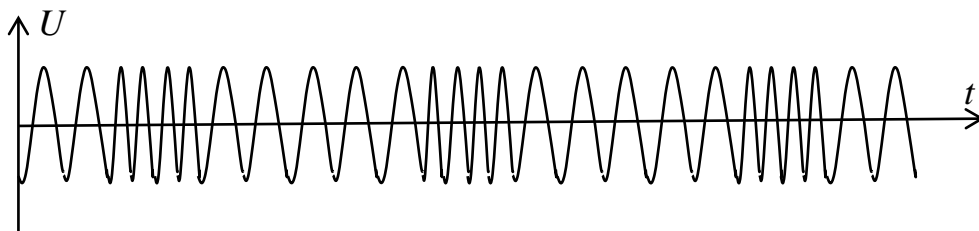


Рисунок 4.2 – Частотно-модулированный сигнал

Частотную модуляцию характеризуют следующие параметры:

- **девиация частоты «вверх»** $\Delta f_{\text{вв}}$ – пиковое отклонение «вверх» закона модуляции при частотной модуляции [2]:

$$\Delta f_{\text{вв}} = \max f_{\text{переменная}}(t), \quad (4.4)$$

где $f_{\text{переменная}}(t)$ – переменная составляющая закона модуляции при частотной модуляции;

- **девиация частоты «вниз»** $\Delta f_{\text{вн}}$ – пиковое отклонение «вниз» закона модуляции при частотной модуляции [2]:

$$\Delta f_{\text{вн}} = \left| \min f_{\text{переменная}}(t) \right|. \quad (4.5)$$

Уравнение частотной модуляции можно представить в следующем виде:

$$f(t) = f_0 + \Delta f \sin \Omega t, \quad (4.6)$$

где f_0 – частота модулируемого сигнала;

Δf – максимальное отклонение частоты от f_0 (девиация частоты);

Ω – круговая частота модулирующего сигнала ($\Omega = 2\pi F$).

Зная Δf , можно определить индекс частотной модуляции, характеризующий степень изменения частоты:

$$\beta = \frac{\Delta f}{F} = \frac{\Delta\omega}{\Omega}, \quad (4.7)$$

где F – частота модулирующего колебания.

При фазовой модуляции изменяется фаза несущего колебания по закону модулирующего сигнала (рисунок 4.3).

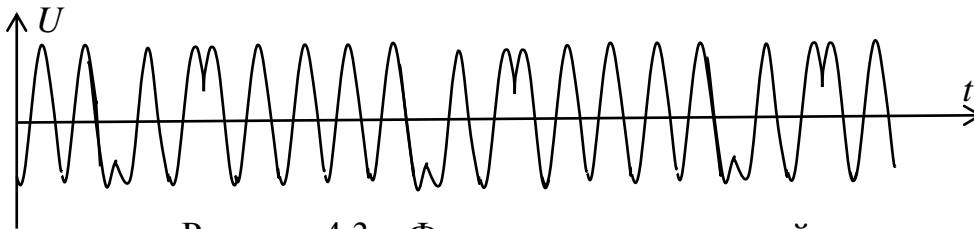


Рисунок 4.3 – Фазово-модулированный сигнал

Характеристикой фазово-модулированного сигнала является **индекс угловой модуляции** Θ – пиковое отклонение закона модуляции фазово-модулированного сигнала при гармоническом законе модуляции [2]:

$$\Theta = \max_{t \in T} \varphi(t) = \max_{t \in T} [\varphi(t) - \bar{\varphi}], \quad (4.8)$$

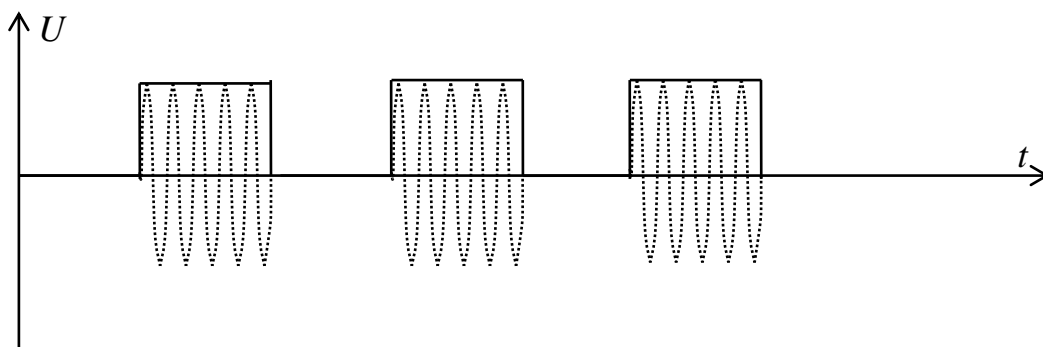
где $\varphi(t) = \varphi_0(t) + \bar{\varphi} = \Theta \cdot \sin(\Omega t + \Psi) + \varphi_0$ – закон модуляции при фазовой модуляции;

Ω – частота модулирующего сигнала;

Ψ – начальная фаза модулирующего сигнала;

$\varphi_0(t)$ – начальная фаза модулируемого сигнала.

В многоканальных системах передачи в качестве переносчика информации используется не гармоническое колебание, а периодическая последовательность радиоимпульсов с четырьмя параметрами: амплитудой, частотой следования, длительностью и фазой (рисунок 4.4).



Пунктирная линия – несущий сигнал;
сплошная линия – результат манипуляции сигнала

Рисунок 4.2 – Сигнал с амплитудной манипуляцией во временной области

Этот процесс называется импульсной модуляцией. При импульсной модуляции образуется последовательность пачек модулированных колебаний. Чаще всего здесь применяются импульсы прямоугольной или колоколообразной формы.

Для передачи цифровых данных используется цифровая модуляция, называемая амплитудной манипуляцией.

4.2 Основные рекомендации к решению задач

4.2.1 Изучить виды модуляции электрических сигналов, применяемые при передаче сообщений.

4.2.2 При решении задач записать аналитическое выражение оцениваемой характеристики и подставить в него численные значения входящих в это выражение величин.

4.3 Задачи для самостоятельного решения

4.3.1 Рассчитать коэффициенты модуляции «вверх» и «вниз» сигнала несущей частоты f . Закон амплитудной модуляции гармонический с параметрами, заданными в таблице 4.1.

Здесь U_m – постоянная составляющая модулирующего колебания; U_{\max} – максимальное значение модулирующего сигнала; U_{\min} – минимальное значение модулирующего сигнала; F – частота модулирующего колебания.

Построить изображение сигнала.

Таблица 4.1 – Значения параметров сигнала амплитудной модуляции

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f , кГц	10	13	16	19	22	45	60	19	30	32
F , Гц	45	60	19	30	32	10	13	16	19	22
U_m , В	50	40	66	69	43	17	77	74	90	48
U_{\max} , В	59	49	78	80	56	27	87	84	99	58
U_{\min} , В	45	38	54	54	33	7	70	70	80	45

Продолжение таблицы 4.1

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
f , кГц	60	19	30	32	16	19	22	45	10	13
F , Гц	13	16	19	22	45	60	19	30	32	10
U_m , В	60	10	56	59	43	67	67	54	40	18
U_{\max} , В	69	19	68	70	46	77	77	64	49	28
U_{\min} , В	65	8	50	54	33	57	60	60	30	15

Продолжение таблицы 4.1

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
f , кГц	22	45	10	19	30	32	19	10	13	24
F , Гц	45	60	19	16	19	22	30	32	10	13
U_m , В	66	74	90	69	48	50	40	43	17	77
U_{max} , В	78	84	99	80	58	59	49	56	27	87
U_{min} , В	54	70	80	54	45	45	38	33	7	70

4.3.2 Гармонический сигнал частотой F и амплитудой U был промодулирован по следующему закону: $F_{mod} = \pm(10U + 0,01F)$ кГц. Определить девиацию частоты и индекс частотной модуляции. Значения переменных, входящих в формулы, заданы в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры частотно-модулированного сигнала

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F , кГц	16	19	22	25	30	32	10	57	13	19
U , В	120	156	240	66	79	90	89	119	105	68

Продолжение таблицы 4.2

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	10
F , кГц	13	19	32	10	57	22	25	30	16	19
U , В	20	56	40	166	75	94	90	19	10	68

Продолжение таблицы 4.2

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
F , кГц	32	57	13	19	19	22	10	16	25	30
U , В	29	15	24	166	179	98	59	19	10	68

5 ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛОВ

5.1 Краткие теоретические сведения

Использование в инфокоммуникационных системах сигналов сложной формы и различных видов модуляции ставит перед измерительной техникой задачу исследования спектров таких сигналов.

Более полную информацию о форме сигнала и о качестве тракта прохождения сигнала дает его спектральное представление.

Спектр сигнала – это совокупность гармонических колебаний, на которые может быть разложено данное сложное колебательное движение. Математически такое колебание представляется в виде периодической функции частоты ω . Ее можно разложить в ряд, членами которого являются функции частоты – гармоники [4].

Гармоника $x_n(t)$ представляет собой гармонический сигнал с амплитудой и начальной фазой, равными соответственно значениям амплитуды и фазы спектральных составляющих периодического сигнала при некотором значении аргумента:

$$x_n(t) = U_n \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (5.1)$$

где n – номер гармоники.

Доказано, что наилучшим образом спектр электромагнитных колебаний описывает ряд, состоящий из гармонических функций (ряд Фурье):

$$\begin{aligned} U(t) &= U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \cos(n\omega t) = \\ &= U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n(\omega) \cdot \cos(n\omega t + \varphi_n), \end{aligned} \quad (5.2)$$

где $c_n(\omega) = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ – спектр амплитуд;

$$\varphi_n(\omega) = \arctg \frac{A_n}{B_n} \text{ – спектр фаз.}$$

Из формулы (5.2) можно сделать вывод, что спектры периодической последовательности сигналов являются дискретными. Форма огибающей спектра зависит от формы сигнала. В предельном случае спектральные линии сближаются и образуют сплошной спектр.

Спектр непериодических сигналов (в частности, одиночных импульсов) описывается интегралом Фурье:

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega, \quad (5.3)$$

где $S(j\omega)$ – комплексный аналитический спектр сигнала $U(t)$, который может быть представлен в следующем виде: $S(j\omega) = S_1(\omega) + jS_2(\omega)$.

Тогда спектр амплитуд непериодического сигнала (одиночного импульса) можно определить по формуле

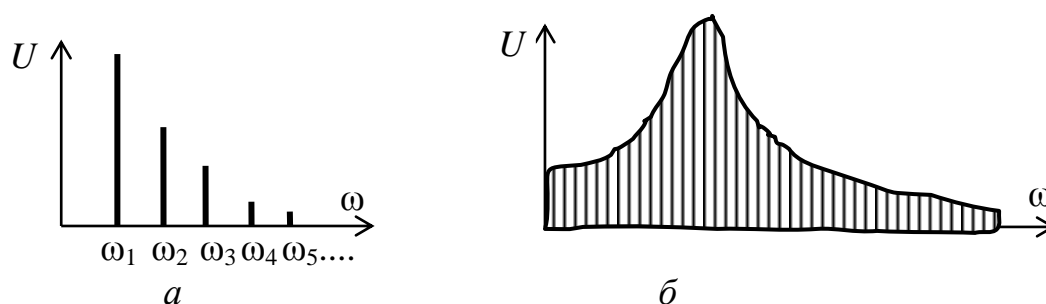
$$S(\omega) = \sqrt{S_1^2(\omega) + S_2^2(\omega)},$$

а спектр фаз – по формуле

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{S_1(\omega)}{S_2(\omega)}.$$

В общем случае спектр сигнала содержит бесконечный ряд гармоник, амплитуды которых убывают с увеличением их номера. Чем сильнее исходный сигнал отличается от гармонического, тем больше гармоник содержится в спектре и тем больше их амплитуды (рисунок 5.1).

Например, спектр звука выражает частотный состав и интенсивность. Чистые тона, звуки с периодической формой волны, а также звуки, полученные при сложении нескольких периодических волн, обладают линейчатыми спектрами (рисунок 5.1, а). Акустические шумы, одиночные импульсы, затухающие звуки имеют сплошной спектр (рисунок 5.1, б).



а – линейчатый спектр; б – сплошной спектр

Рисунок 5.1 – Графическое изображение спектров сигналов

Во избежание потерь или искажения информации при передаче сигнала по линиям связи необходимо, чтобы принятый сигнал был передан с минимальными искажениями (с как можно меньшим количеством низших гармоник).

Кроме того, наличие искажений сигнала приводит к потере его мощности.

Дополнительные гармоники могут возникать при прохождении сигнала в тракте передачи из-за присутствия в нем нелинейных элементов.

Любые изменения формы сигнала, обусловленные нелинейностью тракта передачи при прохождении через него исследуемого сигнала, называют **нелинейными искажениями**. Параметры нелинейных искажений приведены ниже.

Коэффициент гармоник k_r – коэффициент, характеризующий степень отличия формы периодического сигнала от гармонической. Для его оценки необходимо знать напряжения всех гармоник, входящих в спектр сигнала [1]:

$$k_{\Gamma} = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1} \cdot 100\%, \quad (5.4)$$

где U_n – напряжение n -й гармоники сигнала;

U_1 – напряжение первой гармоники.

Значение k_{Γ} в данном случае изменяется в пределах от 0 до ∞ .

Часто для оценки нелинейных искажений используют коэффициент гармоник k'_{Γ} , определяемый по следующей формуле [1]:

$$k'_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}. \quad (5.5)$$

Значения k'_{Γ} изменяются в диапазоне от 0 до 1.

Абсолютное отклонение сигнала ΔU – максимальное значение разности мгновенных значений сигналов, взятых в один и тот же момент времени, на протяжении заданного интервала времени [1]:

$$\Delta U = \max_{t \in T} |U_1(t) - U_2(t)|. \quad (5.6)$$

Относительное отклонение сигнала от линейного закона $k_{\text{н}}$ – отношение абсолютного отклонения данного сигнала от прямой линии, соединяющей мгновенные значения сигнала, соответствующие началу и концу заданного интервала времени, к максимальному значению сигнала на этом интервале [1]:

$$k_{\text{н}} = \frac{\Delta U}{U_{\text{max}}}, \quad (5.7)$$

где ΔU – абсолютное отклонение напряжения сигнала;

U_{max} – максимальное значение сигнала на исследуемом интервале.

Коэффициент нелинейности сигнала $k_{\text{с}}$ – величина, равная отношению размаха производной сигнала на заданный интервал времени к максимальному значению производной на этом же интервале [1]:

$$k_{\text{с}} = \frac{S_{\text{max}}(t) - S_{\text{min}}(t)}{S_{\text{max}}(t)} \cdot 100\%, \quad t \in T, \quad (5.8)$$

где $S(t) = \frac{dU(t)}{dt}$;

T – период сигнала.

Мощность сигнала P рассчитывается как площадь под кривой, описывающей данный сигнал, при помощи следующего соотношения:

$$P = \int_0^{T/2} U^2(t) dt. \quad (5.9)$$

5.2 Основные рекомендации к решению задач

5.2.1 Изучить виды искажений сигналов, возникающих в инфокоммуникационных системах, их влияние на качество связи и способы контроля и устранения нежелательных искажений.

5.2.2 Усвоить физический смысл контролируемых параметров сигналов.

5.2.3 При решении задач записать аналитическое выражение оцениваемой характеристики и подставить в него численные значения входящих в это выражение величин.

5.3 Задачи для самостоятельного решения

5.3.1 Рассчитать коэффициент гармоник сигнала с пятью гармоническими составляющими. Параметры сигнала заданы в таблице 5.1. Записать аналитическое выражение спектра сигнала и изобразить его графически.

Таблица 5.1 – Параметры составляющих спектра сигнала

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T , мс	10	13	16	19	22	45	60	19	30	32
A_1 , В	45	60	19	30	32	10	13	16	19	22
A_2 , В	31	40	10	19	12	1	6	4	9	11
A_3 , В	26	23	5	11	8	0,3	3	3	5	7
A_4 , В	17	11	1	8	3	0,1	2	2	2	3
A_5 , В	5	8	0,3	2	0,5	0,05	1	1	0,5	1

Продолжение таблицы 5.1

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T , мс	15	23	76	10	42	49	66	29	38	39
A_1 , В	85	64	49	86	42	30	53	86	79	92
A_2 , В	31	30	10	19	12	1	6	24	19	41
A_3 , В	16	13	5	11	8	0,3	3	13	15	17
A_4 , В	10	1	1	8	3	0,1	2	12	12	3
A_5 , В	5	0,5	0,3	2	0,5	0,05	1	1	5	1

Продолжение таблицы 5.1

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
T , мс	40	23	19	69	42	44	61	79	90	12
A_1 , В	75	48	89	68	52	76	23	46	57	82
A_2 , В	41	20	10	10	22	18	6	24	19	21
A_3 , В	26	13	5	6	18	3	3	13	5	17
A_4 , В	7	1	1	2	13	1	2	7	2	13
A_5 , В	0,5	8	0,3	0,5	5	0,5	1	1	0,5	8

5.3.2 Рассчитать мощность гармонического сигнала с пятью гармониками и мощность сигнала с одной гармоникой (см. таблицу 5.1).

6 КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

6.1 Краткие теоретические сведения

В многоканальных системах инфокоммуникаций основным (стандартным) каналом является канал тональной частоты (ТЧ), обеспечивающий передачу сообщений в полосе частот 300...3400 Гц.

Сообщения от каждого источника преобразуются с помощью модуляторов (индивидуальных передатчиков) в каналные сигналы, и на выходе образуется групповой сигнал. Он преобразуется в линейный сигнал с помощью группового передатчика и поступает в линию связи (рисунок 6.1).

На приемном конце линии передачи линейный сигнал преобразуется в групповой сигнал, из которого выделяются каналные сигналы, преобразуемые затем с помощью демодуляторов (индивидуальных приемников) в сообщения, получаемые абонентами.

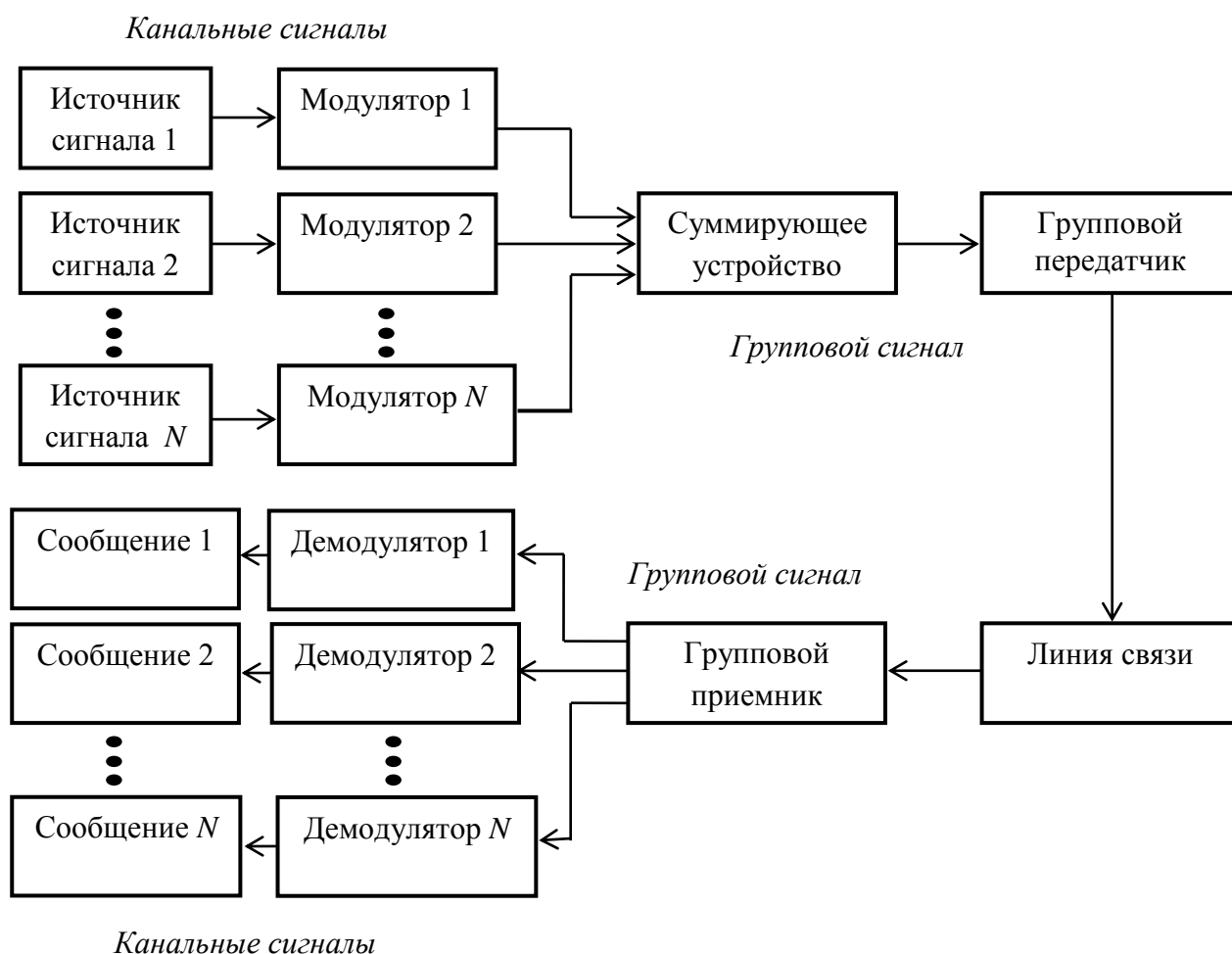


Рисунок 6.1 – Обобщенная структурная схема многоканальной системы передачи

В системах многоканальной телефонной связи с частотным разделением каналов каждому телефонному каналу выделяется полоса частот 4 кГц с интервалами между полосами частот соседних каналов 0,9 кГц, предназначенными для снижения уровня взаимных помех.

В общем случае оборудование линейного тракта включает в себя оконечные устройства, промежуточное оборудование (генераторы, усилители, регенераторы и т. д.), оборудование сопряжения и сервисное оборудование. Для уменьшения помех также необходимо обеспечить высокую степень линейности всего тракта группового сигнала.

В состав тракта в качестве источника сигнала включаются генераторы, формирующие каналные сигналы, и вспомогательные сигналы для обеспечения качественного функционирования оборудования системы передачи.

Согласование каналообразующего оборудования с оборудованием линейного тракта обеспечивается с помощью оборудования сопряжения.

Сервисное оборудование обеспечивает автоматизацию процессов преобразования сигналов и технического обслуживания каналов и трактов систем передачи.

Тракт передачи должен обеспечить передачу группового сигнала с минимумом искажений.

Условием отсутствия амплитудно-частотных искажений является постоянство модуля коэффициента передачи в полосе частот группового сигнала [$K(\omega) = K_0 = \text{const}$], фазочастотных – линейность фазовой характеристики [$\varphi(\omega) = \omega\tau + b_0$].

При выполнении этих условий групповое время прохождения сигнала постоянно:

$$\tau(\omega) = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = \text{const}. \quad (6.1)$$

Входящие в состав групповых трактов реактивные элементы приводят к линейным искажениям. Нелинейные искажения вызываются нелинейностью амплитудной характеристики группового тракта, что приводит к возникновению помех.

Наличие в реальных групповых трактах реактивных элементов приводит к линейным искажениям.

Пусть спектр группового сигнала представляет собой сумму спектров канальных сигналов:

$$U_{\text{вх}}(\omega) = \sum_{n=1}^N U_n(\omega), \quad (6.2)$$

где N – число каналов.

Тогда спектр сигнала на выходе группового тракта будет иметь вид

$$U_{\text{вых}}(\omega) = K(\omega) \cdot U_{\text{вх}}(\omega) = K(\omega) \sum_{n=1}^N U_n(\omega) \cdot K(\omega). \quad (6.3)$$

Линейные искажения группового тракта в многоканальных системах инфокоммуникаций с частотным разделением каналов не приводят к возникновению межканальных помех.

Если амплитудная характеристика группового тракта нелинейна, возникают паразитные гармоники и комбинационные частоты, приводящие к нелинейным искажениям. Их спектры могут совпадать со спектрами сигналов соседних каналов и вызывать межканальные помехи.

Фазовые характеристики каналов и трактов обусловлены большой протяженностью сети инфокоммуникаций и наличием в них фильтров с крутыми частотными характеристиками. Основным фактором, влияющим на качество передачи сигналов, является изменение фазы принятого сигнала при изменении его частоты, поэтому при нормировании параметров каналов и трактов используют величину группового времени прохождения сигнала – первую производную по частоте от фазовой характеристики тракта.

Максимальное значение группового времени прохождения сигнала в канале тональной частоты между наиболее удаленными друг от друга узлами магистральной сети должно быть не более 90 мс, если канал образован наземными системами передачи. Превышение норм группового времени прохождения сигнала приводит к появлению эха в телефонных каналах вплоть до прекращения связи.

В сетевых трактах нормируется отклонение группового времени прохождения сигнала на краях рабочего диапазона.

6.2 Основные рекомендации к решению задач

6.2.1 Изучить структуру и составные элементы линейного тракта многоканальных системах инфокоммуникаций с частотным разделением каналов и его основные контролируемые параметры.

6.2.2 Усвоить физический смысл контролируемых параметров.

6.2.3 При решении задач записать аналитическое выражение оцениваемой характеристики и подставить в него численные значения входящих в это выражение величин.

6.3 Задачи для самостоятельного решения

6.3.1 Построить амплитудно-частотную характеристику в полосе частот группового сигнала и сделать вывод о величине искажений в канале связи. Параметры амплитудно-частотной характеристики заданы в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Параметры амплитудно-частотной характеристики

Частота, Гц	Коэффициент передачи, дБ				
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
300	10,2	6,1	7,1	5,0	8,1
310	10,5	6,2	7,6	5,4	8,5

Продолжение таблицы 6.1

Частота, Гц	Коэффициент передачи, дБ				
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
320	11,8	6,7	7,9	5,9	8,9
330	11,9	6,9	8,5	6,4	9,1
340	11,6	7,2	8,8	6,6	9,6
350	10,8	7,5	9,3	6,9	9,9
360	11,8	7,8	9,4	7,2	10,4
370	11,6	8,2	9,7	7,8	10,8
380	11,9	8,8	10,5	8,5	11,2
390	10,1	9,2	10,9	8,9	11,8

Продолжение таблицы 6.1

Частота, Гц	Коэффициент передачи, дБ				
	Вариант 6	Вариант 7	Вариант 8	Вариант 9	Вариант 10
410	10,2	6,1	7,1	5,0	8,1
420	10,5	6,2	7,6	5,4	8,5
445	11,8	6,7	7,9	5,9	8,9
450	11,9	6,9	8,5	6,4	9,1
467	11,6	7,2	8,8	6,6	9,6
480	10,8	7,5	9,3	6,9	9,9
485	11,8	7,8	9,4	7,2	10,4
488	11,6	8,2	9,7	7,8	10,8
490	11,9	8,8	10,5	8,5	11,2
495	10,1	9,2	10,9	8,9	11,8

Продолжение таблицы 6.1

Частота, Гц	Коэффициент передачи, дБ				
	Вариант 11	Вариант 12	Вариант 13	Вариант 14	Вариант 15
500	10,2	6,1	7,1	5,0	8,1
610	10,5	6,2	7,6	5,4	8,5
720	11,8	6,7	7,9	5,9	8,9
830	11,9	6,9	8,5	6,4	9,1
940	11,6	7,2	8,8	6,6	9,6
1050	10,8	7,5	9,3	6,9	9,9
1060	11,8	7,8	9,4	7,2	10,4
1070	11,6	8,2	9,7	7,8	10,8
1080	11,9	8,8	10,5	8,5	11,2
1090	10,1	9,2	10,9	8,9	11,8

Продолжение таблицы 6.1

Частота, Гц	Коэффициент передачи, дБ				
	Вариант 16	Вариант 17	Вариант 18	Вариант 19	Вариант 20
1100	10,2	6,1	7,1	5,0	8,1
1220	10,5	6,2	7,6	5,4	8,5
1320	11,8	6,7	7,9	5,9	8,9
1430	11,9	6,9	8,5	6,4	9,1
1540	11,6	7,2	8,8	6,6	9,6
1650	10,8	7,5	9,3	6,9	9,9
1760	11,8	7,8	9,4	7,2	10,4
1870	11,6	8,2	9,7	7,8	10,8
1980	11,9	8,8	10,5	8,5	11,2
2000	10,1	9,2	10,9	8,9	11,8

Продолжение таблицы 6.1

Частота, Гц	Коэффициент передачи, дБ				
	Вариант 21	Вариант 22	Вариант 23	Вариант 24	Вариант 25
1500	10,2	6,1	7,1	5,0	8,1
1610	10,5	6,2	7,6	5,4	8,5
1720	11,8	6,7	7,9	5,9	8,9
1830	11,9	6,9	8,5	6,4	9,1
1940	11,6	7,2	8,8	6,6	9,6
2050	10,8	7,5	9,3	6,9	9,9
2060	11,8	7,8	9,4	7,2	10,4
2070	11,6	8,2	9,7	7,8	10,8
2080	11,9	8,8	10,5	8,5	11,2
2090	10,1	9,2	10,9	8,9	11,8

Продолжение таблицы 6.1

Частота, Гц	Коэффициент передачи, дБ				
	Вариант 26	Вариант 27	Вариант 28	Вариант 29	Вариант 30
2500	10,2	6,1	7,1	5,0	8,1
2610	10,5	6,2	7,6	5,4	8,5
2720	11,8	6,7	7,9	5,9	8,9
2830	11,9	6,9	8,5	6,4	9,1
2940	11,6	7,2	8,8	6,6	9,6
3050	10,8	7,5	9,3	6,9	9,9
3100	11,8	7,8	9,4	7,2	10,4
3200	11,6	8,2	9,7	7,8	10,8
3300	11,9	8,8	10,5	8,5	11,2
3400	10,1	9,2	10,9	8,9	11,8

6.3.2 Записать спектры сигналов на выходе тракта. Параметры сигналов заданы в таблице 6.1.

7 АНАЛОГО-ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ В ЦИФРОВЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

7.1 Краткие теоретические сведения

Аналого-цифровое оборудование обеспечивает формирование цифрового двоичного сигнала, состоящего из импульсов и пробелов (единиц и нулей). Этот сигнал транслируется по цифровой линии передачи на противоположную оконечную станцию системы передачи; при этом должна быть обеспечена необходимая достоверность передачи.

Цифровой линейный тракт как тракт системы передачи должен содержать среду распространения цифрового сигнала и устройства, обеспечивающие требуемое качество передачи. Структурная схема цифрового линейного тракта приведена на рисунке 7.1.

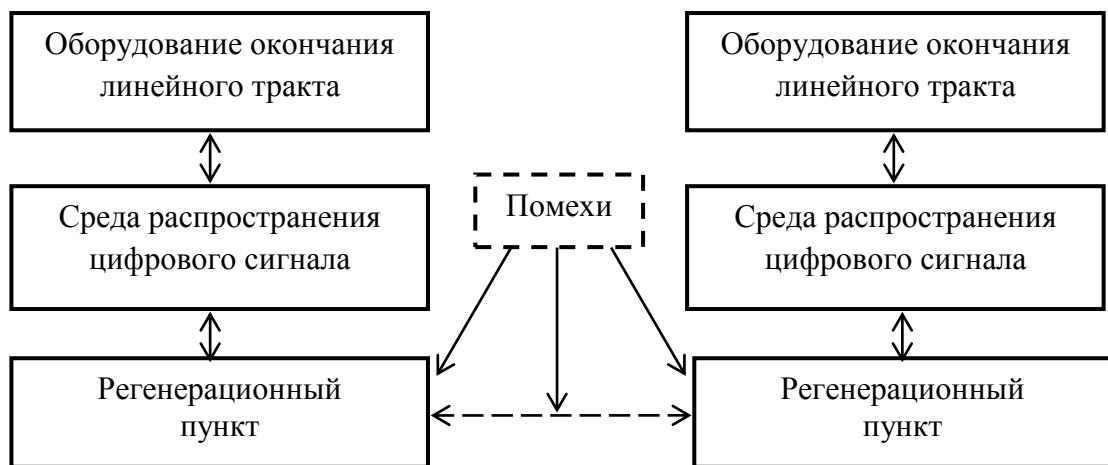


Рисунок 7.1 – Обобщенная структурная схема цифрового линейного тракта

Оборудование окончания цифрового линейного тракта формирует линейный цифровой сигнал на передающей стороне и восстанавливает его на приемной стороне. Регенерационные пункты предназначены для регенерации (восстановления) цифрового сигнала на промежуточных участках линейного тракта. Физические свойства среды распространения сигнала определяют условия передачи и воздействие на передаваемые сигналы, а также степень помехозащищенности.

Кроме того, с увеличением частоты передаваемого сигнала увеличивается затухание, что ограничивает полосу частот цифрового сигнала сверху. Это приводит к так называемой межсимвольной интерференции, заключающейся в наложении двух соседних импульсов друг на друга.

Межсимвольная интерференция приводит и к изменениям амплитуды, и к временным сдвигам символов, и к искажению формы символа.

Согласующие устройства и усилители, входящие в состав тракта передачи, ограничивают полосу частот цифрового сигнала снизу. Это приводит к снижению возможности регистрации полезного импульса на фоне помех.

Влияние помехи на сигнал зависит от способа организации передачи (однокабельная или двухкабельная).

Качество передачи сигнала определяется, кроме того, способом его оцифровки, т. е. преобразования аналогового (непрерывного) сигнала в цифровой (дискретный) в аналого-цифровом преобразователе (АЦП).

Аналого-цифровыми называют преобразователи, преобразующие аналоговый (непрерывный) сигнал в дискретные сигналы, а результат преобразования представляется в цифровой форме.

В процессе преобразования происходит дискретизация измеряемой величины по времени, квантование ее по уровню и цифровое кодирование.

При дискретизации по времени мгновенные значения сигнала $X(t)$ могут быть определены только в отдельные моменты времени, называемые моментами дискретизации, а интервал времени между двумя ближайшими моментами дискретизации называется шагом дискретизации. При равномерной дискретизации шаг дискретизации остается постоянным, а при неравномерной – меняется по определенному закону.

Квантование по уровню предполагает замену действительных мгновенных значений сигнала $X(t)$ ближайшими фиксированными величинами из некоторой совокупности известных значений (уровней квантования). Разность между двумя соседними уровнями квантования называется шагом квантования. При равномерном квантовании шаг квантования постоянен, при неравномерном – меняется.

Сформированные таким образом дискретные сигналы несут информацию о значениях квантованных уровней. Такой дискретный сигнал состоит из узких импульсов с амплитудой, равной амплитуде сигнала в момент взятия отсчета. Его называют *сигналом с амплитудно-импульсной модуляцией* (АИМ, или *РАМ – Pulse Amplitude Modulation*).

При дискретизации берутся мгновенные значения сигнала через равные промежутки времени, а далее каждый уровень квантования кодируется последовательностью $b = \log_2 U$ бит. Такой сигнал называется *сигналом с импульсно-кодовой модуляцией* и является цифровым.

В зависимости от способа преобразования аналогового сигнала в цифровой строятся структурные схемы АЦП.

Различают *временное*, *частотно-импульсное* и *кодоимпульсное* преобразование. В свою очередь, кодо-импульсное преобразование может осуществляться по принципу развертывающего и следящего уравнивания.

При реализации *временного преобразования* сигнал преобразуется в интервал времени, который пропорционален напряжению сигнала. Для этого сигнал сравнивается с образцовым сигналом с генератора образцового линейного напряжения, и в моменты равенства этих двух сигналов образуются короткие импульсы, из которых потом формируется импульс длительности τ , пропорциональной напряжению сигнала U :

$$U = \frac{dU_0}{dt} \cdot \tau, \quad (7.1)$$

где U_0 – напряжение на выходе генератора образцового линейного напряжения;
 $\frac{dU_0}{dt}$ – скорость изменения напряжения образцового генератора.

При **частотно-импульсном преобразовании** сигнал преобразуется в пропорциональную ему частоту следования импульсов. Входной сигнал поступает на вход интегратора, где интегрируется с постоянной времени τ_1 . На выходе интегратора напряжение линейно возрастает в течение времени t_1 и сравнивается с образцовым напряжением U_0 с помощью схемы сравнения.

Сигнал схемы сравнения воздействует на формирователь импульсов обратной связи, и на входе интегратора в течение времени t_2 действуют два сигнала: преобразуемое напряжение U и напряжение обратной связи U_{oc} отрицательной полярности с постоянной времени τ_2 [5]. Частота импульсов обратной связи f_x пропорциональна напряжению U :

$$f_x = \frac{1}{T_x} = \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \frac{1}{U_{oc} \cdot t_2} \right). \quad (7.2)$$

Кодо-импульсное преобразование с развертывающим уравниванием осуществляется следующим образом. С блока образцовых напряжений сигнал в виде набора образцовых напряжений с «весами» 8, 4, 2, 1 и возможностью увеличения их в 10 раз в каждом десятичном разряде сравнивается с напряжением сигнала U . Сравнение начинается с «веса» 8. Если напряжение U меньше образцового напряжения, в дешифраторе записывается «0» первого разряда, если больше – «1» второго разряда. Цикл сравнения заканчивается, когда суммарное образцовое напряжение будет равно U .

При следящем уравнивании преобразователь реагирует на изменение напряжения сигнала непрерывно, а напряжение образцового генератора меняется ступенчато.

7.2 Основные рекомендации к решению задач

7.2.1 Изучить методы преобразования сигналов в цифровой код.

7.2.2 При выполнении задания изобразить структурную схему преобразователя и зарисовать временные диаграммы напряжения на выходе каждого блока структурной схемы.

7.3 Задания для самостоятельного выполнения

7.3.1 Изобразить структурную схему и временные диаграммы на выходе элементов схемы для аналого-цифрового преобразователя, реализующего время-импульсный метод преобразования.

7.3.2 Изобразить структурную схему и временные диаграммы на выходе элементов схемы для аналого-цифрового преобразователя, реализующего частотно-импульсный метод преобразования.

7.3.3 Изобразить структурную схему и временные диаграммы на выходе элементов схемы для аналого-цифрового преобразователя, реализующего кодо-импульсный метод преобразования с развертывающим уравниванием.

7.3.4 Изобразить структурную схему и временные диаграммы на выходе элементов схемы для аналого-цифрового преобразователя, реализующего кодо-импульсный метод преобразования с поразрядным уравниванием.

8 ИЗМЕРЕНИЯ В ЦИФРОВЫХ КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ

8.1 Краткие теоретические сведения

Бинарный цифровой канал – цифровой канал с передачей информации в простой двоичной форме (без линейного кодирования) – можно представить в виде следующей упрощенной структурной схемы (рисунок 8.1).

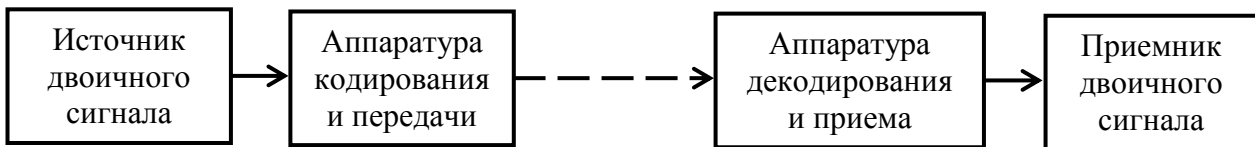


Рисунок 8.1 – Структурная схема бинарного цифрового канала

Параметры и характеристики цифровой системы передачи (ЦСП) можно классифицировать следующим образом:

- параметры, свойственные аналоговой части ЦСП: рабочая полоса частот, номинальные уровни передаваемых и принимаемых сигналов, входное и выходное сопротивление, затухание асимметрии, групповое время прохождения сигнала, остаточное затухание, частотная характеристика остаточного затухания, амплитудная характеристика, частотная характеристика, неравномерности группового времени запаздывания, защищенность от переходных влияний, шумы незанятого канала (последние семь параметров определяются способом формирования сигнала в ЦСП);

- параметры, специфические для ЦСП, зависящие от способа преобразования аналогового сигнала в цифровой: отношение сигнал/шум квантования (ОСШК), фазовое дрожание (джиттер), коэффициент ошибок.

Рекомендациями *ITU-T O.132 «Quantizing distortion measuring equipment using a sinusoidal test signal* (дискретизирующее измерительное оборудование для измерения искажения, использующее синусоидальный испытательный сигнал)» [6] нормируется величина ОСШК.

Реальные значения ОСШК для ЦСП с импульсно-кодовой модуляцией лежат в пределах от плюс 5 до 0 дБ при уровнях входного сигнала от минус 30 до 0 дБ и не более 10 дБ при уровне входного сигнала минус 55 дБ.

Фазовое дрожание характеризует нарушение периодичности следования (фазовый сдвиг) цифровых посылок, обусловленное неидеальностью процессов синхронизации. К его причинам можно отнести внешние шумы, переходные влияния, расстройку цепей синхронизации регенераторов, характеристики самого сигнала, в том числе изменения статистики сигнала.

Наряду с фазовым дрожанием причинами возникновения ошибок являются собственные искажения сигналов, а также шумы и помехи различного происхождения.

Важнейшим показателем назначения канала передачи информации, который необходимо измерять, является достоверность передачи информации. В цифровых каналах этот показатель характеризуется числом ошибок, возникающих при передаче дискретной информации.

К величине коэффициента ошибок $k_{\text{ош}}$ при передаче сигналов в ЦСП предъявляются жесткие требования. Так, значение $k_{\text{ош}} = 10^{-3}$ считается аварийным в ЦСП при передаче речевых сигналов. При значении $k_{\text{ош}} = 10^{-6}$ качество речевых сигналов практически не ухудшается. В системах передачи данных требования к верности передачи выше: величина $k_{\text{ош}}$ для различных систем при нормальном функционировании имеет порядок $10^{-10} - 10^{-12}$ [7].

Рекомендациями *ITU-T* установлены следующие измеряемые параметры:

- коэффициент ошибок $k_{\text{ош}}$;
- число ошибок $N_{\text{ош}}$ за интервал времени $T_{\text{изм}} = 10^n$, $n = -2, -1, 0, 1, 2, 3$;
- интервал времени TN , за который накопилось N ошибок;
- процент времени δ_m , в течение которого $k_{\text{ош}}$ не превысил допустимого значения;
- число односекундных интервалов $mN = 0$ и $mN \neq 0$, в течение которых полностью отсутствуют либо присутствуют ошибки соответственно [6].

Коэффициент ошибок измеряется как для отдельных участков регенерации, так и для тракта в целом по формуле

$$k_{\text{ош}} = N_{\text{ош}} / N, \quad (8.1)$$

где N – общее число символов, переданных за интервал измерения;

$N_{\text{ош}}$ – число ошибочно принятых символов за интервал измерения.

Измерение коэффициента ошибок носит статистический характер, так как получаемый за конечное время результат является случайной величиной.

Относительную погрешность измерения в случае нормального закона распределения числа ошибок, что допустимо при $N \geq 10$, можно определить по формуле

$$\eta = t_{\beta} / \sqrt{N_{\text{ош}}}, \quad (8.2)$$

где t_{β} – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности результата измерений.

$$t_{\beta} = \frac{1+\beta}{2} \Phi^*(x), \quad (8.3)$$

где $\Phi^*(x)$ – обратная функция интеграла вероятности $\Phi(x)$:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt. \quad (8.4)$$

Значение $k_{\text{ош}}$ позволяет оценивать вероятность ошибки $p_{\text{ош}}$ – количественную оценку помехоустойчивости.

Область возможных значений оценки, в которой с заданной доверительной вероятностью будет находиться значение $p_{\text{ош}}$, определяется верхней ($p_{\text{в}}$) и нижней ($p_{\text{н}}$) доверительными границами. При нормальном законе распределения числа ошибок значения $p_{\text{в}}$ и $p_{\text{н}}$ определяются по формулам

$$p_B = k_{\text{ош}} + t_{\beta} \sqrt{k_{\text{ош}}(1-k_{\text{ош}})/N}, \quad (8.5)$$

$$p_B = k_{\text{ош}} - t_{\beta} \sqrt{k_{\text{ош}}(1-k_{\text{ош}})/N}. \quad (8.6)$$

Очевидно, что точность оценок вероятности ошибки и коэффициента ошибок растет с увеличением N .

Общее число символов цифрового сигнала, переданных за интервал измерения T , зависит от скорости передачи B : $N = T \cdot B$. Отсюда следует, что чем больше скорость передачи, тем быстрее и точнее можно оценить коэффициент ошибок [7].

Измеряемые параметры, определенные международными рекомендациями *ITU-T G.821* «Параметры ошибок международного цифрового соединения сети *ISDN* на скорости ниже первичной» [8], *ITU-T G.826* «Нормы ошибок международных цифровых трактов, работающих при постоянной скорости передачи в битах при первичной скорости передачи или выше» [9], *ITU-T M.2100* «Нормы качественных показателей при вводе в эксплуатацию и техническом обслуживании международных трактов и соединений *PDH* многих операторов» [10], приведены ниже:

- **AS** (с) (от англ. *availability seconds* – время готовности канала) – вторичный параметр, равный разности между общей длительностью теста и временем неготовности канала;

- **AS** (%) (от англ. *availability seconds* – относительное время готовности канала) – параметр, характеризующий готовность канала, выраженный в процентах. В отличие от **AS** (с), **AS** (%) является первичным параметром и входит в число основных параметров рекомендации *G.821*. Его можно интерпретировать как вероятностную меру качества предоставляемого пользователю канала [11];

- **BER**, или **RATE** (от англ. *bit error rate* – частота битовых ошибок, коэффициент ошибок по битам) – основной параметр в цифровых системах передачи, равный отношению числа битовых ошибок к общему числу битов, переданных за время проведения теста по каналу, находящемуся в состоянии готовности [11];

- **ES** (от англ. *errors seconds* – длительность поражения сигнала ошибками, количество секунд с ошибками) – параметр, показывающий интервал времени поражения всеми видами ошибок в канале, находящемся в состоянии готовности;

- **ES** (%) (от англ. *errors seconds* – процент поражения сигнала ошибками);

- **SES** (с) (от англ. *several errors seconds* – продолжительность многократного поражения ошибками; количество секунд, пораженных ошибками) – односекундный период, который содержит ≥ 30 % блоков с ошибкой или по крайней мере один дефект;

- **SES** (%) (от англ. *several errors seconds* – относительная продолжительность многократного поражения ошибками) – тот же параметр, выраженный в процентах;

- **UAS** (с) (от англ. *unavailability seconds* – время неготовности канала) – параметр, который начинает отсчитываться с момента обнаружения 10 последовательных интервалов **SES** и увеличивается после каждых следующих 10 по-

следовательных интервалов SES . Этот параметр определяет стабильность работы цифрового канала [11];

- UAS (%) (от англ. *unavailability seconds* – относительное время неготовности канала) – предыдущий параметр, выраженный в процентах.

Рассмотрим, как по данным об ошибках рассчитывается параметр BER .

Предположим, что приемник «принимает решение», какой бит передается (0 или 1), путем стробирования фототока. Если обозначить через I_1 и I_0 фототоки, стробированные приемником в течение 1 и 0 битов соответственно, а через σ_1 и σ_0 – соответствующие шумы, то в предположении о том, что шумы имеют гауссовское распределение, параметр BER определяется следующим образом [7]:

$$BER = Q(x) \left(\frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 - \sigma_1} \right), \quad (8.7)$$

где $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy$ – вероятность того, что нулевая средняя вариация гауссовской переменной превышает значение x .

Качество цифрового тракта по критерию ошибок делят на три категории:

- нормальное – $BER < 10^{-6}$;
- пониженное – $10^{-6} \leq BER < 10^{-3}$ (предаварийное состояние);
- неприемлемое – $BER \geq 10^{-3}$ (аварийное состояние).

В качестве эталонной модели такого распределения принимается участок высокой категории качества протяженностью 25 000 км, которому присваивается 40 % от общей нормы качества на параметры ошибок передачи «точка – точка», что в пересчете на 1 км дает 0,0016 %/км. Остальные четыре участка (два среднего качества и два с приемлемым качеством) длиной 2×1250 км расположены по обе стороны от центрального. Поэтому распределение A_L , пропорциональное протяженности L км тракта высокой категории качества, будет определяться как

$$A_L = 0,0016 \cdot L, \text{ %/км [7].}$$

Различают три метода подсчета BER [11].

1 Расчет BER после приема первых 100 ошибок, что автоматически гарантирует высокую точность измерения (лучше 10 %). Этот метод отличается большим требуемым временем измерения.

2 Расчет BER непосредственно после начала измерения без привязки к количеству принятых битовых ошибок. В этом случае для обеспечения точности измерений расчет отношения делается после приема определенного количества битов, а точность измерения определяется пороговым значением количества принятых битов.

3 Вычисление BER точно после приема 100 ошибочных битов. Этот метод является модификацией первого. На передающей станции устанавливают заданный в технических условиях на аппаратуру линейного тракта уровень оптического излучения и подключают генератор испытательных сигналов. На при-

емной станции подключают измеритель коэффициента ошибок. Изменяя значения уровней средней мощности, измеряют коэффициент ошибок. Время измерения определяют в зависимости от скорости передачи, объема информации и значений коэффициента ошибок $k_{\text{ош}_i}$ (*BER*).

Коэффициент ошибок при заданном уровне оптического излучения вычисляют по формуле

$$k_{\text{ош}} = \bar{k} \pm \Delta k_{\text{ош}} \cdot \alpha, \quad (8.9)$$

где \bar{k} и $\Delta k_{\text{ош}}$ – соответственно среднее значение и погрешность измерения коэффициента ошибок при пяти и более измерениях с интервалом в три минуты;

α – коэффициент, учитывающий наличие погрешности измерения при проведении n измерений [12].

$$\bar{k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{\text{ош}_i}, \quad (8.10)$$

$$\Delta k_{\text{ош}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{k} - k_{\text{ош}_i})^2}. \quad (8.11)$$

8.2 Основные рекомендации к решению задач

8.2.1 Изучить номенклатуру параметров, характеризующих качество цифрового канала передачи согласно рекомендациям *ITU-T*, и их физический смысл.

8.2.2 Изучить методы оценки параметров.

8.3 Задача для самостоятельного решения.

При анализе цифровой системы передачи со скоростью V в течение времени T было получено $N_{\text{ош}}$ ошибок (таблица 8.1). По результатам анализа вычислить следующие статистические параметры:

- оценку коэффициента ошибок $k_{\text{ош}}$;
- абсолютную погрешность оценки коэффициента ошибок $k_{\text{ош}} \Delta$;
- относительную погрешность δ коэффициента ошибок при заданной доверительной вероятности $P_d = 0,95$ (для четных вариантов) и $P_d = 0,99$ для нечетных;
- число ошибок $N_{\text{ош}}$, которое должно быть зарегистрировано в процессе измерения, чтобы с заданной доверительной вероятностью P_d методическая погрешность оценки коэффициента ошибок не превышала нормированного значения δ_0 ;
- область возможных значений оценки коэффициента ошибок, в которой с заданной доверительной вероятностью P_d будет находиться значение $k_{\text{ош}}$.

Сделать вывод о состоянии системы передачи (нормальное, аварийное).

Привести структурную схему и описать принцип работы низкоскоростного детектора ошибок (нечетные варианты) и высокочастотного детектора ошибок (четные варианты).

Таблица 8.1 – Результаты анализа цифровой системы передачи

Вариант	n	Параметр			
		Скорость передачи V , кбит/с	Время измерения T , с	Число ошибочно принятых битов, $N_{\text{ош}}$	Нормированное значение относительной погрешности, $\delta_{\text{зад}}$
1	5	34 368	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
2	6	64	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
3	7	2048	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
4	8	8448	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
5	9	34 368	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
6	7	139 264	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
7	5	34 368	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
8	8	8448	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
9	6	2048	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
10	4	64	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
11	9	139 264	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
12	11	34 368	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
13	8	8448	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
14	9	2048	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
15	6	64	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
16	7	34 368	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
17	5	64	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
18	8	139 264	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
19	10	34 368	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
20	7	8448	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
21	6	2048	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
22	5	64	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
23	8	34 368	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
24	9	64	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
25	8	64	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
26	5	139 264	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
27	10	2048	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
28	8	34 368	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,01 \cdot n$
29	9	8448	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$
30	7	2048	$1000 \cdot n$	$10 \cdot n$	$0,1 \cdot n$

9 ОСНОВНЫЕ КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЕТЕЙ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ

9.1 Краткие теоретические сведения

Терминология устанавливается ГОСТ 21879–88 «Телевидение вещательное. Термины и определения» [13].

Система вещательного телевидения – совокупность характеристик и параметров, определяющих способы формирования, передачи и приема информации об изображении и звуке телевизионной программы [13].

Под **телевизионным видеосигналом** понимают телевизионный сигнал в исходной полосе видеочастот.

Телевизионный стандарт вещательного телевидения – совокупность нормированных параметров, определяющих систему вещательного телевидения [13].

Тракт вещательного телевидения – комплекс технических средств для передачи телевизионного изображения от входа телевизионного датчика до экрана телевизора включительно и для передачи звукового сопровождения от входа микрофона до громкоговорителя телевизора включительно [13].

Полный цветовой телевизионный сигнал (ПЦТС) – сложный по структуре электрический сигнал, состоящий из цветового телевизионного сигнала и специальных сигналов, служащих для обеспечения нормальной работы ТВ-приемника [13].

Цветовой телевизионный сигнал – аналоговый сигнал, состоящий из сигнала яркости и сигнала цветности [13].

Специальные сигналы (сигналы синхронизации, или синхроимпульсы) – служебные импульсы различной длительности, предназначенные для обеспечения синхронной и синфазной работы телевизора и передающей ТВ-камеры [13].

Одна из реализаций структурной схемы типового тракта передачи изображения представлена на рисунке 9.1.

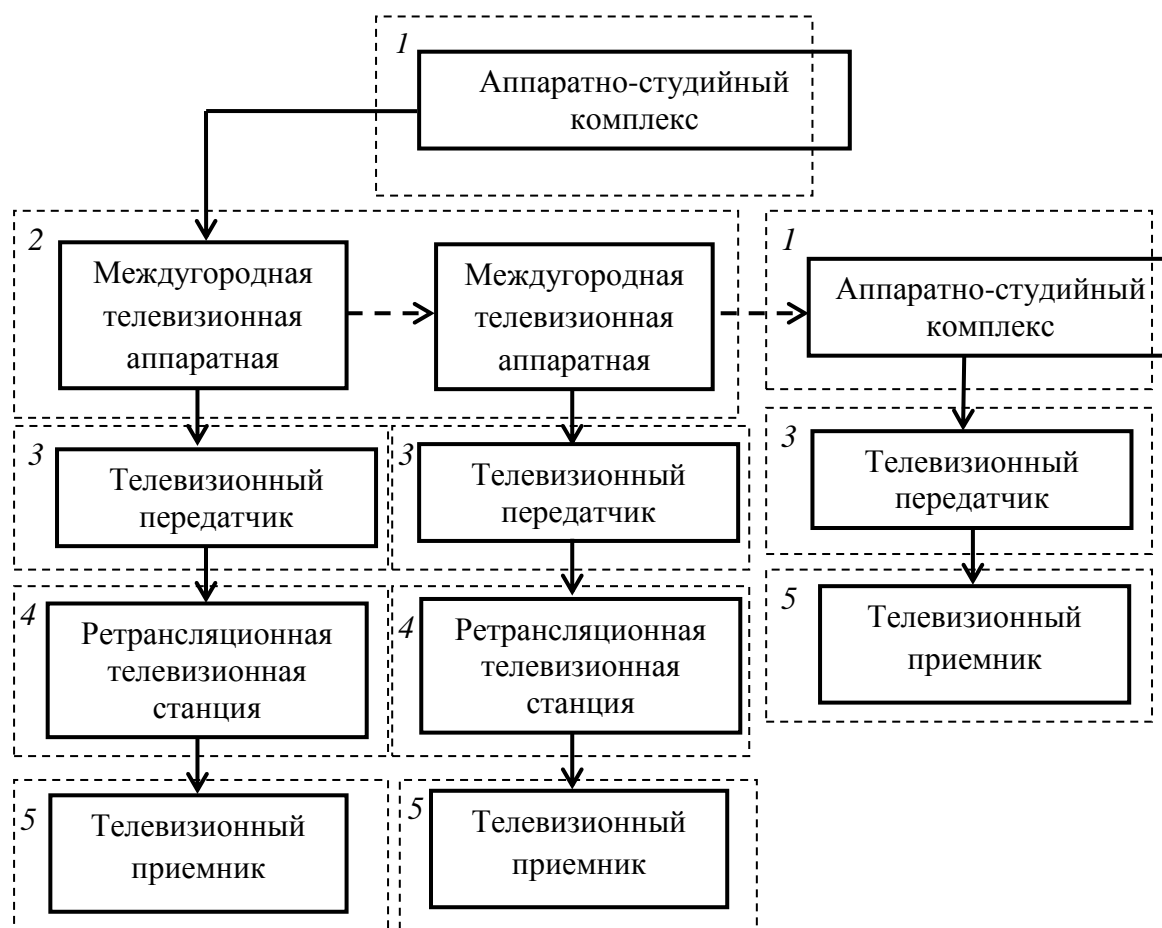
Устройства аппаратно-студийного комплекса (АСК), преобразующие изображения в ПЦТС и обрабатывающие их для последующей передачи в тракт вещательного телевидения, составляют **канал изображения АСК**. ПЦТС передается из АСК, формирующей программу, до АСК пункта назначения.

Далее ПЦТС преобразуется в радиосигнал изображения, подаваемый в **канал изображения телевизионного радиопередатчика**.

Телевизионный ретранслятор принимает телевизионный радиосигнал, преобразует его в электромагнитные колебания и передает в другой радиоканал.

Телевизионная приемная антенна принимает эти колебания, преобразует их в телевизионные радиосигналы и передает на входы телевизионных приемников.

В **канале изображения телевизионного приемника** радиосигнал преобразуется в телевизионное изображение.



1 – канал изображения аппаратно-студийного комплекса; 2 – канал изображения станции распределения телевизионных программ; 3 – канал изображения телевизионного приемника; 4 – канал изображения ретрансляционной телевизионной станции; 5 – канал изображения телевизионного приемника

Рисунок 9.1 – Структурная схема типового тракта передачи изображения

К типовым каналам передачи относятся канал тональной частоты, основной канал звукового вещания, канал передачи телевизионных сигналов, или канал изображений.

Нормы на показатели качества звеньев тракта передачи изображения и методы их измерений устанавливаются в стандартах на звенья тракта.

Ниже представлены параметры, по которым оценивается качество телевизионного канала.

Параметры канала тональной частоты:

- эффективно передаваемая полоса частот – 300–3400 Гц;
- активное сопротивление входа и выхода канала – 600 Ом;
- уровень сигнала на входе канала $P_{вх} = 13$ дБ, на выходе $P_{вых} = 4$ дБ;
- номинальное значение остаточного затухания – минус 17 дБ;
- частота опорного измерительного сигнала – 800 Гц;

- среднеквадратическое отклонение остаточного затухания на частоте 800 Гц – не выше 1 дБ;

- разность между средней и номинальной величиной остаточного затухания – не более 0,5 дБ;

- максимальное отклонение остаточного затухания от номинального значения – не выше 2,2 дБ с вероятностью 0,95;

- пропускная способность канала тональной частоты – 25 кбит/с [13].

Параметры основного канала звукового вещания:

- эффективно передаваемые полосы частот (ЭППЧ) – полосы частот, на крайних границах которых остаточное затухание превосходит затухание на частоте 800 Гц не более чем на 4,3 дБ, – от 35 до 15 000 Гц, от 50 до 10 000 Гц и от 80 до 6300 Гц (высший, первый и второй классы соответственно);

- неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) канала звукового вещания – не более 1–2 дБ на средних частотах и не более 4,3 дБ на крайних;

- динамический диапазон – 40 дБ;

- защищенность от помех – не хуже 60 дБ;

- коэффициент нелинейных искажений – не выше 0,03 [13].

Параметры канала передачи телевизионных сигналов, или канала изображений:

- частота типового сигнала передачи с ЭППЧ – до 6,5 МГц;

- частотные искажения определяются нормированной АЧХ телевизионного канала;

- отклонение остаточного затухания – 2 дБ;

- отношение размаха сигнала изображения к напряжению взвешенной флуктуационной помехи – не хуже 57 дБ в течение 99 % времени передачи;

- номинальное входное сопротивление канала телевизионного вещания – 75 Ом при затухании несогласованности не менее 24 дБ [13].

Для передачи широкополосных канальных сигналов используются объединение соседних по частоте каналов тональной частоты и создание групповых трактов.

Полоса частот, выделенная для ТВ-вещания, разбита на пять частотных диапазонов, в которых может быть размещено 73 радиоканала:

1) 48,5–66 МГц (радиоканалы 1 и 2);

2) 76–100 МГц (радиоканалы 3–5);

3) 174–230 МГц (радиоканалы 6–12);

4) 470–582 МГц (радиоканалы 21–34);

5) 582–960 МГц (радиоканалы 35–82).

Между вторым и третьим радиоканалами расположена полоса частот 7 МГц (66–73 МГц), отведенная для звукового радиовещания в области очень высоких частот с частотной модуляцией.

Ограничивающие полосу любого дециметрового канала частоты f_n и f_v и частота несущей изображения $f_{0_{из}}$ радиоканала определяются следующими соотношениями:

$$f_{\text{н}} = 470 + (N_{\text{к}} - 21) \cdot 8 = 302 + 8N_{\text{к}}, \text{ МГц};$$

$$f_{\text{в}} = 470 + (N_{\text{к}} - 20) \cdot 8 = 310 + 8N_{\text{к}}, \text{ МГц};$$

$$f_{0_{\text{из}}} = 470 + (N_{\text{к}} - 21) \cdot 8 + 1,25 = 303,25 + 8N_{\text{к}}, \text{ МГц},$$

где $N_{\text{к}}$ – номер канала.

Нижняя граница полосы частот ограничена частотами, используемыми для целей радиовещания и радиосвязи. Кроме того, для уменьшения частотных искажений при выделении полного ТВ-сигнала из радиосигнала необходимо, чтобы несущая частота изображения в несколько раз превышала максимальную частоту спектра модулирующего ТВ сигнала $f_{\text{в}} \approx 6,25 \text{ МГц}$.

Верхнюю границу полосы частот определяют частоты сигналов, на которых начинают оказывать влияние рассеяние и поглощение в атмосфере.

При чересстрочной развертке число строк в кадре z должно быть нечетным:

$$z = 2m + 1, \quad (9.1)$$

где m – целое число.

Для системы телевидения на 625 строк в кадре

$$m = (z - 1)/2 = 312. \quad (9.2)$$

Максимальная частота спектра видеосигнала определяется по формуле

$$f = 0,75 \frac{K \cdot z^2 \cdot f_{\text{к}}}{2(1 - \alpha)}, \quad (9.3)$$

где K – формат кадра ($K = l/h$, где l – ширина изображения; h – высота изображения);

z – число строк в кадре;

$f_{\text{к}}$ – частота кадров, Гц;

α – относительная длительность строчного обратного хода.

9.2 Основные рекомендации к решению задач

9.2.1 Изучить номенклатуру параметров, характеризующих качество цифрового канала передачи согласно рекомендациям *ITU-T*, и их физический смысл.

9.2.2 Изучить методы оценки параметров.

9.3 Задачи для самостоятельного решения

9.3.1 Вычислить количество каналов связи, необходимых для одновременной передачи всего изображения, если количество каналов связи, необходимых для передачи информации об одном элементе изображения, равно M , а количество передаваемых элементов равно N . Значения M и N для разных вариантов указаны в таблице 9.1. Составить модель изображения. Сделать вывод о возможности реализации такой передачи.

Таблица 9.1 – Количество каналов связи

Показатель	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>M</i>	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
<i>N</i>	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54

Продолжение таблицы 9.1

Показатель	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>M</i>	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
<i>N</i>	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32

Продолжение таблицы 9.1

Показатель	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
<i>M</i>	45	24	25	26	27	32	46	47	48	29
<i>N</i>	28	51	52	53	49	50	23	30	31	54

9.3.2 При чересстрочной развертке число строк в кадре $z = 1875$, частота кадров $f_k = 30$ Гц, длительность поля $\tau = 17$ мс, относительная длительность строчного обратного хода $\alpha = 0,3$, формат кадра $K = 16 : 9 = 1,78$. Определить максимальную частоту спектра видеосигнала.

10 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛНОГО ЦВЕТОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО СИГНАЛА

10.1 Краткие теоретические сведения

Для качественного воспроизведения изображения на экране телевизионного приемника необходимо, чтобы сигнал изображения передавался синхронно со специальными сигналами, обеспечивающими синхронность и синфазность сигналов на передающем устройстве и приемниках телевизоров. Если это условие не выполняется, изображение передается с искажениями, а при определенных условиях возможна и потеря сигнала.

Шкалу уровней ПЦТС устанавливает ГОСТ 7845–92 «Система вещательного телевидения. Основные параметры. Методы измерений» [14].

Специальные сигналы и сигналы изображения, входящие в состав ПЦТС, передаются в общем канале связи. Сигналы синхронизации передаются во время обратного хода луча по строкам и полям. Для гашения обратного хода луча в видеосигнал подмешиваются сигналы гашения (гасящие импульсы) отрицательной полярности и передаются во время обратного хода луча. Синхроимпульсы располагаются на вершинах гасящих импульсов, что позволяет отделить их от других сигналов, используя селективные устройства.

Объединение цветового сигнала и сигналов синхронизации осуществляется на телевизионном передающем центре.

За опорный уровень (уровень гашения) принят уровень, равный 0 В. Выше этого уровня передаются сигналы изображения, а ниже – сигналы синхронизации. Уровень сигнала, соответствующий минимальному значению яркости передаваемого изображения, называется **уровнем черного**. Уровень сигнала, соответствующий максимальному значению яркости передаваемого изображения, называется **уровнем белого**. Между этими уровнями располагаются все остальные значения сигнала изображения.

Ниже уровня гашения располагается **уровень синхроимпульсов (уровень синхронизации)**, который определяется амплитудой импульсов синхронизации. Иногда говорят, что синхроимпульсы располагаются в области «чернее черного».

Согласно требованиям ГОСТ 7845–92 уровень синхронизации принимается за 0 %, уровень гашения – за 30 %, а уровень белого – за 100 %.

Установлены следующие параметры ПЦТС:

- номинальный размах ПЦТС от уровня синхронизации до уровня белого – 1 В (100 %);
- размах сигнала яркости (сигнала изображения) от уровня гашения до уровня белого – 70 % от номинального размаха ПЦТС;
- номинальная длительность строки $H = 64$ мкс;
- длительность гасящего импульса строки $a = 12$ мкс;
- длительность синхронизирующего импульса строки $d = 4,7$ мкс;
- номинальная длительность поля $v = 20$ мс;

- длительность гасящего импульса полей $j = 25H + a = 1612$ мкс;
- длительность уравнивающего импульса $p = 2,35$ мкс;
- длительность синхронизирующих импульсов полей кадрового синхроимпульса (КСИ) $m = 2,5H = 160$ мкс;
- длительность первой последовательности уравнивающих импульсов $L = 2,5H = 160$ мкс;
- длительность второй последовательности уравнивающих импульсов $L = 2,5H = 160$ мкс [14].

Поскольку в вещательных системах телевидения используется чересстрочная развертка, ПЦТС состоит из сигналов первого и второго поля.

В состав сигналов каждого поля входят:

- сигналы изображения (рисунки 10.1, 10.2);
- гасящие импульсы строк (рисунки 10.1, 10.2);
- строчные синхронизирующие импульсы (ССИ) (рисунки 10.1, 10.2, 10.3);
- синхронизирующие импульсы полей (КСИ) (рисунок 10.4);
- сигналы цветовой синхронизации (СЦС) (рисунки 10.4, 10.6);
- гасящие импульсы полей (рисунок 10.5);
- специальные сигналы (например, передающие информацию телетекста).

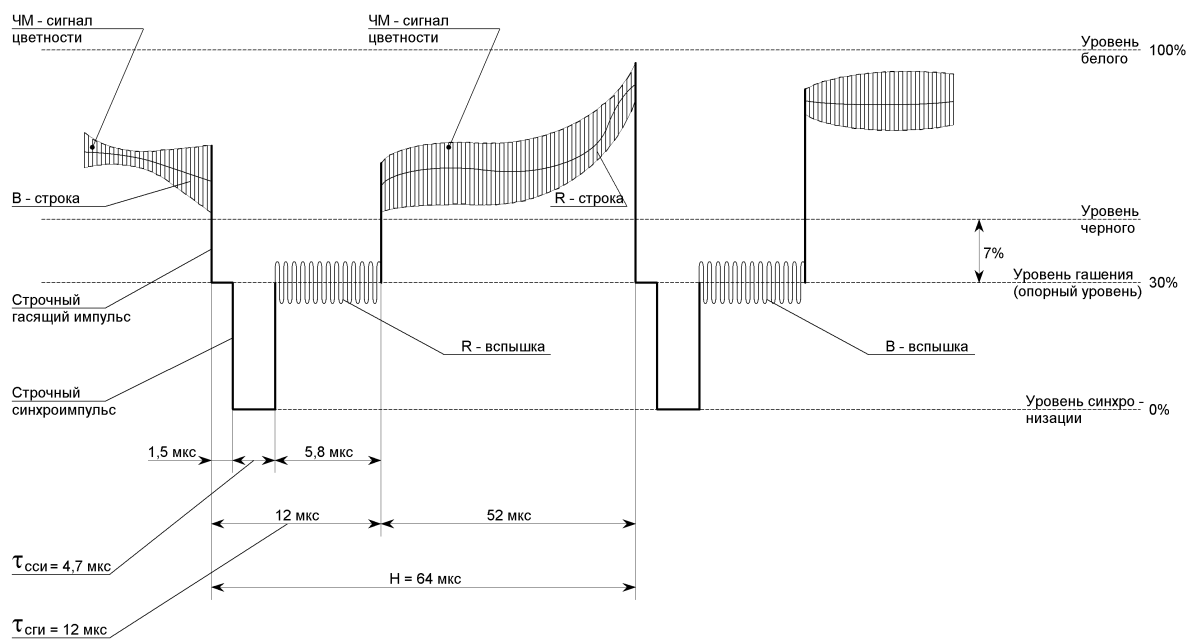


Рисунок 10.1 – Основные параметры строки цветного сигнала изображения

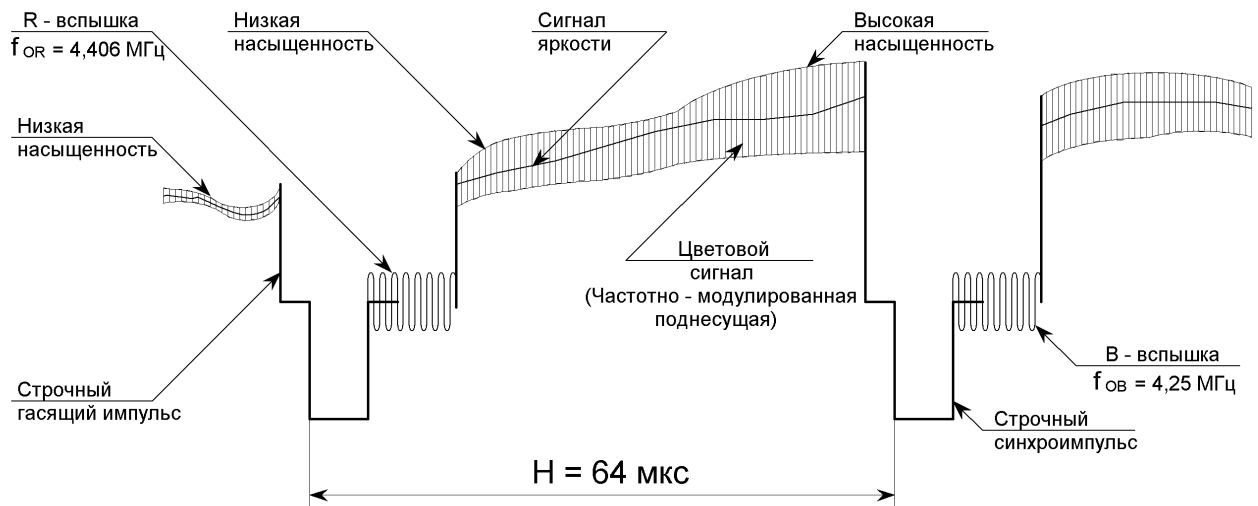


Рисунок 10.2 – ПЦТС (фрагмент). Яркость и насыщенность цветového сигнала

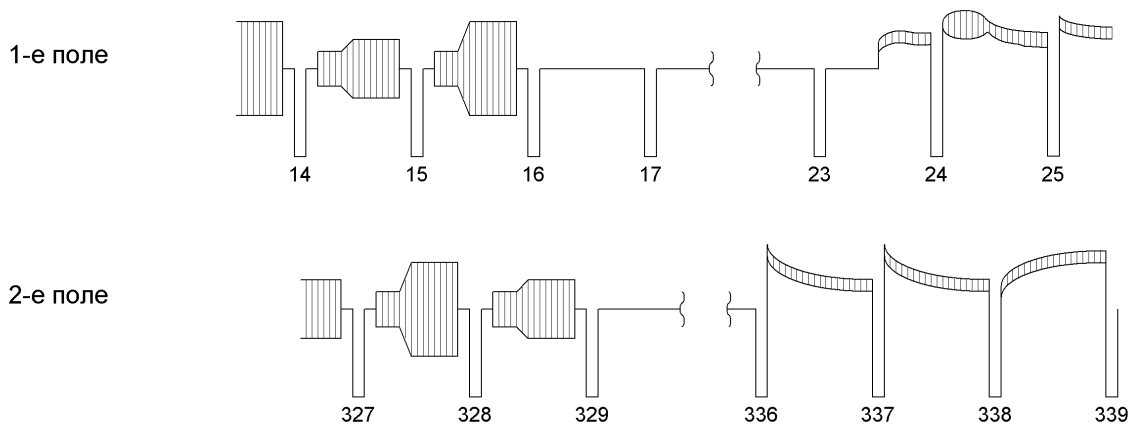


Рисунок 10.3 – ПЦТС (фрагмент). Начало передачи изображения

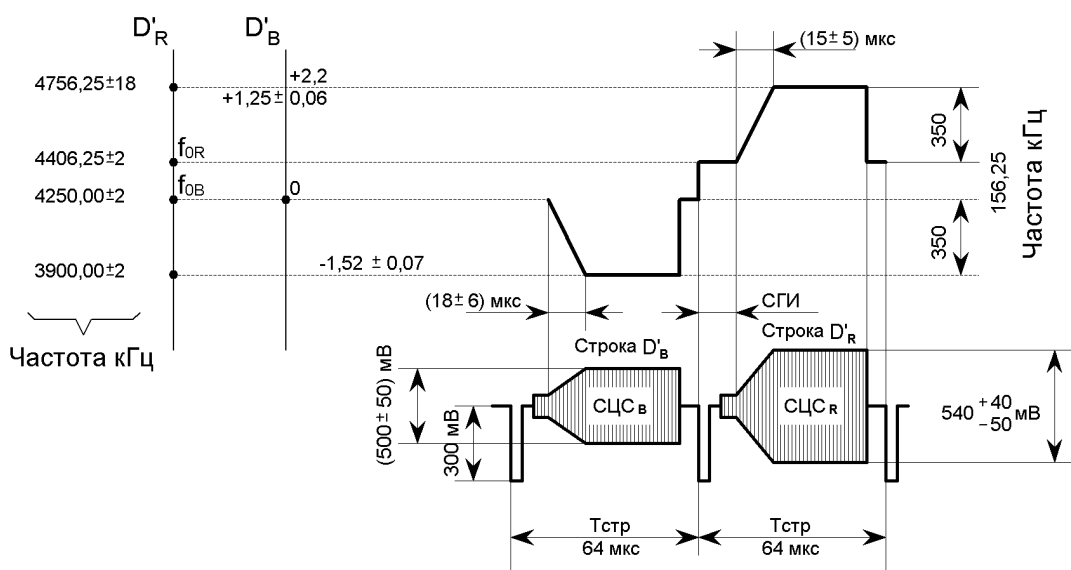


Рисунок 10.4 – Параметры сигналов цветовой синхронизации

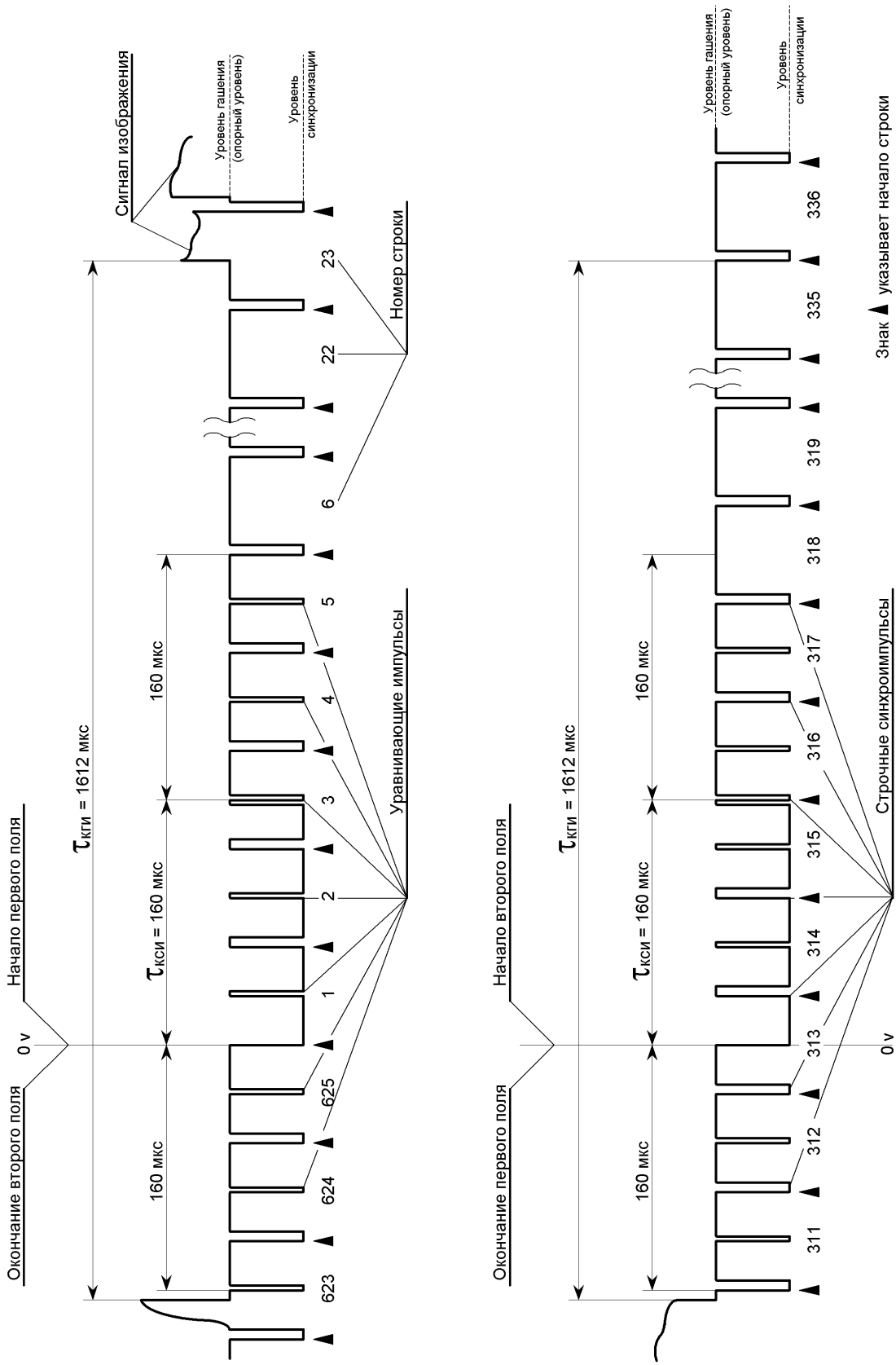


Рисунок 10.5 – Гасящие, синхронизирующие и уравнивающие импульсы

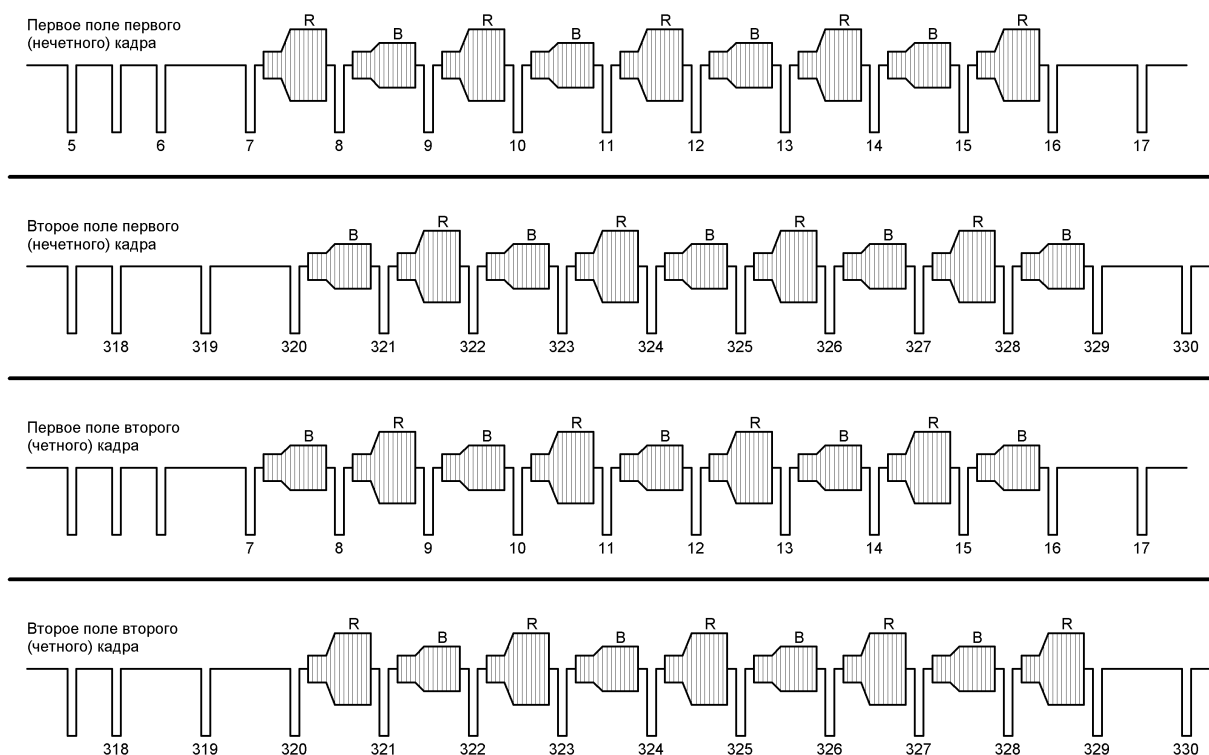


Рисунок 10.6 – ПЦТС (фрагмент). Расположение сигналов цветовой синхронизации на гасящем импульсе полей

За начало отсчета времени берется момент 0_V – передний фронт кадрового синхроимпульса (рисунок 10.3). Этот момент определяется на передающем ТВ-центре задающим синхрогенератором. Длительность синхронизирующего импульса полей равна 160 мкс. Синхронизирующий импульс полей начинается через 160 мкс после окончания передачи последней строки изображения в каждом поле.

Длительность кадрового гасящего импульса равна 1612 мкс. Длительность кадрового синхроимпульса равна 160 мкс. Длительность строчного гасящего импульса – 12 мкс, строчного синхроимпульса – 4,7 мкс.

В течение кадровых синхроимпульсов строчные синхроимпульсы передаются в виде «врезок» для обеспечения непрерывной работы генератора синхроимпульсов.

При чересстрочной развертке одно поле содержит 312,5 строк, следовательно, в одном поле кадровый синхроимпульс совпадает со строчным синхроимпульсом, а во втором поле приходится на середину строки.

Для обеспечения работы чересстрочной развертки необходимо, чтобы временной сдвиг между моментами синхронизации генераторов строчной и кадровой разверток был равен половине длительности строки (32 мкс), поэтому «врезки» на кадровом импульсе делаются в два раза больше частоты строк, а перед и после кадрового синхроимпульса вводятся по пять так называемых уравнивающих импульсов длительностью 2,35 мкс. В противном случае вместо чересстрочной развертки получается построчная с меньшим количеством строк,

что сказывается на четкости изображения, а также приводит к дрожанию изображения, уменьшению четкости по вертикали и увеличению заметности строчной структуры раstra.

Расположение всех описанных сигналов в структуре ПЦТС за один кадр приводится в таблице 10.1.

Таблица 10.1 – Расположение сигналов в структуре полного цветowego телевизионного сигнала

Сигналы	Сигналы изображения	Импульсы гашения полей	Синхроимпульсы полей	Сигналы цветовой синхронизации	Сигналы телетекста
Первое поле	Со второй половины 23-й строки до конца 310-й строки	Со второй половины 623-й строки до половины 23-й строки	Со второй половины 623-й строки до конца 5-й строки	С начала 7-й строки до конца 15-й строки	С начала 17-й строки до конца 18-й строки
Второе поле	С начала 336-й строки до второй половины 623-й строки	С начала 311-й строки до конца 335-й строки	С начала 311-й строки до половины 318-й строки	С начала 320-й строки до конца 328-й строки	С начала 330-й строки до конца 331-й строки

В передающей камере цветного телевидения формируются три первичных сигнала изображения E_R , E_G , E_B , соответствующих красным, зеленым и синим составляющим цвета передаваемого объекта. Ни один из этих сигналов не содержит полной информации о яркости объекта, поэтому в системе цветного телевидения из трех первичных сигналов формируется четвертый сигнал – сигнал яркости E_Y .

Сигналы E_R , E_G и E_B уравниваются по размаху.

Далее производится сложение сигналов с учетом спектральной чувствительности зрения:

$$E_Y = 0,30E_R + 0,59E_G + 0,11E_B, \quad (10.1)$$

где $E_R = E_G = E_B$.

Этот сигнал передается непрерывно на каждой строке развертки в полосе частот 6 МГц и позволяет воспроизводить нормальное черно-белое изображение на экранах черно-белых и цветных телевизоров.

Наличие сигнала яркости приводит к тому, что достаточно передавать любые два сигнала из E_R , E_G и E_B , а третий восстанавливать в приемнике методом вычитания переданных первичных сигналов из сигнала яркости.

Во всех системах цветного телевидения принято передавать красный (E_R) и синий (E_B) первичные сигналы, полосу частот которых благодаря пониженной разрешающей способности зрения к синим и красным цветам удастся сократить до 1...1,5 МГц.

Зеленый первичный сигнал E_G восстанавливается в приемнике:

$$E_G = (E_Y - 0,30E_R - 0,11E_B)/0,59. \quad (10.2)$$

Поскольку сигнал E_Y содержит полную информацию о яркости передаваемого объекта, из сигналов E_R и E_B эта информация исключается и они передаются в виде цветоразностных сигналов:

$$E_{R-Y} = E_R - E_Y = 0,70E_R - 0,59E_G - 0,11E_B; \quad (10.3)$$

$$E_{B-Y} = E_B - E_Y = -0,30E_R - 0,59E_G + 0,89E_B. \quad (10.4)$$

Отсюда следует, что сигнал изображения цветного телевидения формируется из широкополосного сигнала яркости E_Y и двух узкополосных цветоразностных сигналов E_{R-Y} и E_{B-Y} .

10.2 Основные рекомендации к решению задач

10.2.1 Изучить требования к параметрам системы вещательного телевидения и методы и измерения по ГОСТ 7845–92.

10.2.2 Изучить составляющие ПЦТС.

10.2.3 При решении задач учесть масштаб.

10.3 Задачи для самостоятельного решения

10.3.1 Построить сигналы изображения, импульсы гашения полей, синхроимпульсы полей, сигналы цветовой синхронизации и сигналы телетекста. Четные варианты – сигналы первого поля, нечетные варианты – сигналы второго поля.

10.3.2 Рассчитать уровни сигнала яркости, сигналов красного, синего, зеленого цветов, суммарного сигнала яркости (после матрицирования) и цветоразностных сигналы и отметить их на графиках из предыдущей задачи. Номинальный размах ПЦТС 1 В.

Таблица 10.2 – Параметры полного цветового телевизионного сигнала

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размах сигнала изображения по отношению к номинальному размаху ПЦТС, %	65,00	65,12	65,82	65,91	66	66,54	66,12	66,92	66,45	65,23

Продолжение таблицы 10.2

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Размах сигнала изображения по отношению к номинальному размаху ПЦТС, %	66,00	66,12	65,73	65,28	67	66,98	66,19	66,72	66,34	65,57

Продолжение таблицы 10.2

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Размах сигнала изображения по отношению к номинальному размаху ПЦТС, %	65,38	65,72	65,57	66,71	66,19	66,83	66,59	66,22	66,55	65,33

11 СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

11.1 Краткие теоретические сведения

В современной сети ТВ-вещания для передачи ТВ-сигналов по радиоканалам используется амплитудная модуляция, основным достоинством которой является то, что амплитудно-модулированный сигнал занимает сравнительно узкую полосу частот. На рисунке 11.1 представлены номинальные амплитудно-частотные характеристики радиопередатчиков изображения и звукового сопровождения.

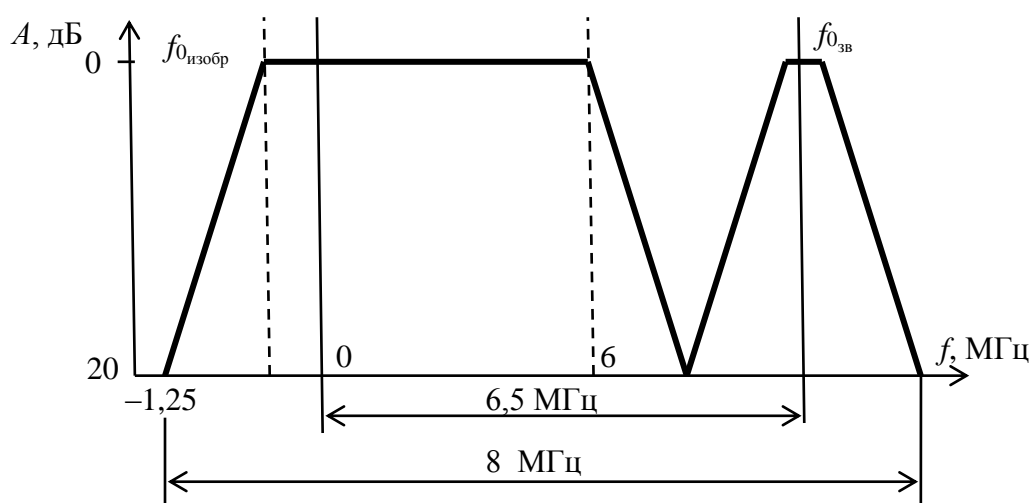


Рисунок 11.1 – Номинальные амплитудно-частотные характеристики радиопередатчиков изображения и звукового сопровождения

Согласно ГОСТ 7845–92 амплитудно-частотная характеристика тракта изображения ТВ-приемника должна иметь форму, представленную на рисунке 11.2 [14].

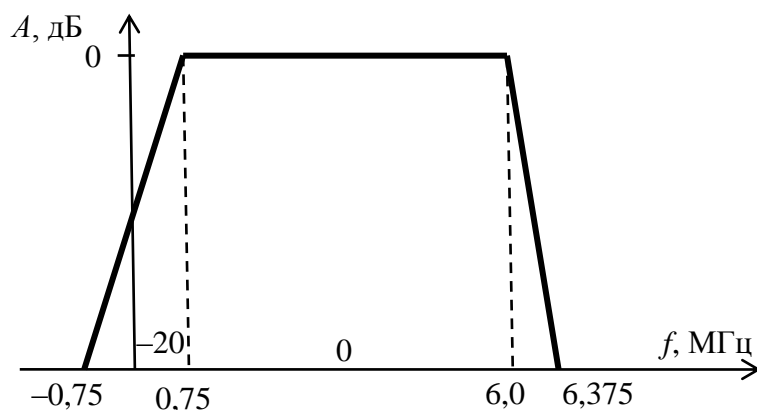


Рисунок 11.2 – Номинальная амплитудно-частотная характеристика тракта изображения телевизионного приемника

Для передачи ТВ-сигналов по радиоканалам в принципе можно использовать как амплитудную, так и частотную модуляцию. В случае частотной модуляции для обеспечения высокой помехоустойчивости передачи необходимо, чтобы индекс модуляции $m_{\text{чм}}$ был равным 3–5. При этом полоса частот $\Delta f_{\text{чм}}$, занимаемая частотно-модулированным сигналом, будет определяться соотношением

$$\Delta f_{\text{чм}} \approx 2f_B + 2\Delta f_D, \quad (11.1)$$

где Δf_D – девиация частоты ($\Delta f_D = m_{\text{чм}} \cdot f_B$);

f_B – частота сигнала.

Например, для получения и передачи сигналов цветности в системе *SECAM* используется частотная модуляция поднесущих частот цветоразностными сигналами.

При детектировании частотно-модулированных сигналов в условиях наличия флуктуационных помех происходит значительное ухудшение соотношения сигнал/шум на выходе частотного детектора, особенно в области верхних частот спектра модулирующего сигнала.

Одним из способов повышения помехоустойчивости ТВ-системы является введение частотных предискажений передаваемых сигналов с последующей их коррекцией на приемном конце. Принцип действия частотных предискажений основан на особенностях воздействия помех на частотно-модулированный сигнал: при приеме частотно-модулированных сигналов наиболее опасным является паразитное изменение частоты и фазы высокочастотного колебания под воздействием помехи.

Корректирующая цепь предискажений обеспечивает подъем высокочастотных составляющих сигнала. Графическое изображение частотной характеристики корректирующей цепи представлено на рисунке 11.3.

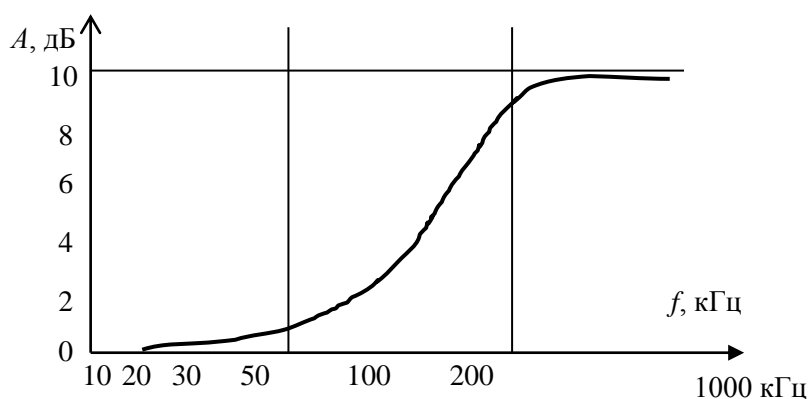


Рисунок 11.3 – Частотная характеристика корректирующей цепи

Поскольку предискажениям подвергается немодулированный (низкочастотный) сигнал цветности, данный вид предискажений называется низкочастотными предискажениями.

Для неискаженного приема цветоразностного сигнала в ТВ-приемнике необходимо скорректировать внесенные частотные предискажения. С этой це-

лю в тракт усиления цветоразностного сигнала следует включить корректирующий фильтр с частотной характеристикой, имеющей спад в области верхних частот. Полная коррекция будет иметь место, если частотная характеристика корректирующего звена в приемнике станет обратной частотной характеристикой звена предыскажения на передающем конце.

Частотная характеристика цепи коррекции низкочастотных предыскажений представлена на рисунке 11.4.

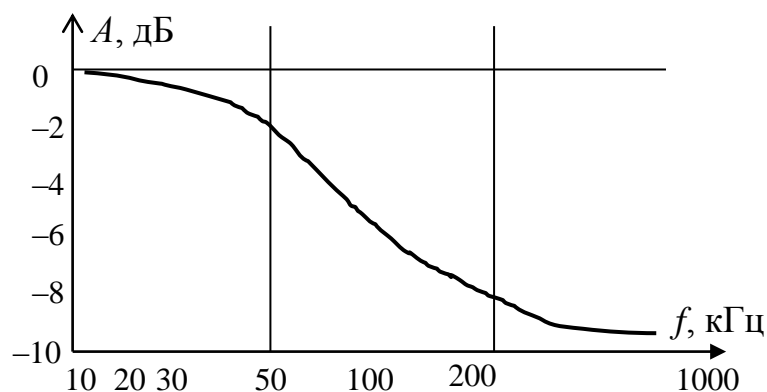


Рисунок 11.4 – Частотная характеристика цепи коррекции низкочастотных предыскажений

Частотная характеристика корректирующего звена (см. рисунок 11.4) имеет спад, увеличивающийся по мере повышения частоты. Помехи, поступающие в приемник вместе с полезным сигналом, после значительно ослабляются на выходе фильтра. При этом высокочастотные составляющие спектра помехи, имеющие большую интенсивность, ослабляются в большее число раз.

Другой вид предыскажений, применяемый в системе *SECAM*, – это высокочастотные предыскажения, которым подвергается частотно-модулированный сигнал цветности. Цель этих предыскажений та же, что и у предыскажений видеосигналов: увеличение помехозащищенности каналов яркости и цветности приемника.

Результатом предыскажений модулированного сигнала является увеличение амплитуды поднесущей частоты (рисунок 11.5).

При отклонении частоты от номинального значения коэффициент передачи возрастает, что позволяет повысить уровень спектральных составляющих сигнала, удаленных от поднесущей и в большей степени подверженных воздействию помех.

В телевизионном приемнике необходимо иметь цепь коррекции высокочастотных предыскажений с частотной характеристикой, обратной частотной характеристике цепи введения предыскажений на передающем конце.

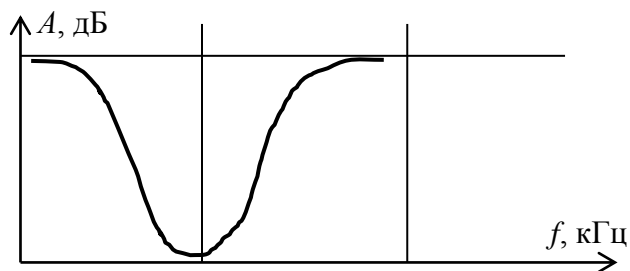


Рисунок 11.5 – Зависимость коэффициента передачи цепи высокочастотных предуслаживаний

Номинальная амплитудно-частотная характеристика цепи предуслаживания цветоразностных сигналов определяется выражением [14]

$$A_1(f) = \left| \frac{1 + \frac{jf}{f_1}}{1 + \frac{jf}{3f_1}} \right|, \quad (11.2)$$

где $f_1 = 85$ кГц;

j – мнимая единица.

Номинальная амплитудно-частотная характеристика цепи предуслаживания сигнала цветности определяется выражением [14]

$$A_1(f) = \left| \frac{1 + j16F}{1 + j1,26F} \right|, \quad (11.3)$$

$$\text{где } F = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}; \quad (11.4)$$

$f_0 = 4286$ кГц.

Максимальное отклонение частоты от номинального значения не должно превышать 20 кГц.

11.2 Основные рекомендации к решению задач

11.2.1 Изучить структуру номинальных амплитудно-частотных характеристик тракта изображения ТВ-приемника согласно ГОСТ 7845–92.

11.2.2 Изучить структуру номинальных амплитудно-частотных характеристик радиопередатчиков изображения и звукового сопровождения согласно ГОСТ 7845–92.

11.2.3 При решении задач соблюдать масштаб графического изображения.

11.3 Задача для самостоятельного решения

Построить графики амплитудно-частотной характеристики цепи предискажения цветоразностных сигналов и цепи предискажения сигнала цветности. Значения $A_1(f)$ выразить в децибелах. Значения частот указаны в таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Значения частот цепи предискажения цветоразностных сигналов, кГц

Вариант									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
160	156	168	90	148	154	170	140	110	150
345	328	365	245	285	295	340	265	290	340
500	498	512	400	456	447	499	412	420	556
678	670	671	578	555	578	654	582	590	699
856	812	834	811	756	756	820	712	711	856
1100	1095	1110	999	934	912	990	990	980	1059
1280	1180	1310	1197	1180	1180	1170	1210	1187	1199
1498	1298	1450	1398	1250	1398	1340	1410	1350	1350
1690	1450	1630	1590	1401	1540	1550	1580	1510	1490
1967	1634	1867	1867	1967	1767	1743	1767	1700	1767
2560	1987	2260	2180	2560	2160	1911	2000	2010	1960
2754	2054	2554	2354	2754	2354	2154	2180	2190	2254
2890	2190	2790	2690	2890	2590	2290	2344	2360	2490
3000	2560	2985	2956	3000	2980	2360	2611	2560	2780
3156	2880	3140	3111	3156	3177	2580	2915	2800	3030
3290	3090	3300	3390	3290	3390	2790	3100	3190	3270
3379	3290	3400	3479	3379	3479	3190	3200	3279	3311
3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500

Продолжение таблицы 11.1

Вариант									
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
110	196	128	190	178	124	160	177	120	178
315	318	315	345	295	265	320	255	256	333
520	488	582	500	426	407	479	492	430	516
668	620	691	678	585	518	634	682	588	669
896	892	824	800	716	780	810	812	701	875
1175	1056	1010	1090	904	999	980	1150	981	1019
1380	1280	1210	1297	1280	1280	1150	1370	1167	1169
1598	1498	1480	1598	1350	1598	1320	1410	1320	1365

Продолжение таблицы 11.1

1790	1650	1610	1790	1481	1740	1490	1620	1530	1498
1967	1834	1830	1967	1667	1989	1643	1797	1712	1707
2260	2000	2160	2280	1890	2260	1811	1964	2012	1930
2654	2154	2254	2454	2054	2454	2054	2080	2180	2154
2890	2390	2590	2635	2290	2690	2190	2544	2356	2390
3100	2660	2785	2856	2500	2880	2390	2711	2660	2980
3200	2980	3040	3011	2756	3077	2560	2900	2860	3046
3300	3190	3100	3190	3090	3190	2730	3165	3170	3220
3400	3370	3270	3379	3279	3213	3290	3300	3256	3341
3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500

Продолжение таблицы 11.1

Вариант									
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
130	146	158	150	145	144	112	110	148	178
315	318	315	290	288	275	300	235	280	310
487	488	492	500	453	417	470	400	414	526
618	630	661	678	559	678	624	552	580	689
786	832	844	801	751	856	790	732	712	866
932	1015	1000	993	939	1112	950	987	960	1040
1165	1194	1280	1227	1170	1380	1140	1170	1117	1299
1488	1314	1460	1318	1260	1498	1330	1400	1310	1450
1650	1550	1610	1545	1491	1640	1530	1680	1490	1690
1937	1784	1890	1807	1917	1867	1700	1867	1600	1867
2360	1915	2210	2165	2580	2190	1888	2060	1910	2060
2554	2111	2514	2424	2724	2314	2114	2280	2200	2354
2790	2390	2788	2620	2810	2510	2280	2444	2380	2690
2967	2660	2975	2856	3200	2780	2460	2601	2540	2880
3256	2813	3150	3000	3356	3077	2590	2975	2770	3040
3390	3190	3310	3190	3210	3290	2770	3160	3160	3210
3479	3390	3465	3379	3399	3414	3090	3300	3290	3325
3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500

12 ПАРАМЕТРЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ. ОПТИЧЕСКИЕ СТЕКЛА

12.1 Краткие теоретические сведения

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) обладают следующими преимуществами по сравнению с проводными (медными) и радиорелейными системами связи:

- малое затухание сигнала (0,15 дБ/км), что позволяет передавать информацию на значительно бóльшие расстояния без использования усилителей;
- высокая пропускная способность оптического волокна, что дает возможность передавать информацию на высокой скорости;
- высокая надежность оптической среды (оптические волокна не окисляются, не намокают, не подвержены слабому электромагнитному воздействию);
- информационная безопасность (подслушать или изменить информацию можно только путем физического вмешательства в линию передачи);
- высокая защищенность от межволоконных влияний (уровень экранирования излучения более 100 дБ).

К недостаткам можно отнести относительную хрупкость оптоволокна; сложность соединения в случае разрыва; сложность преобразования сигнала в интерфейсном оборудовании; сложную технологию изготовления как самого волокна, так и компонентов ВОЛС; относительную дороговизну оконечного оптического оборудования; замутнение волокна вследствие радиационного облучения. Однако следует сказать, что существуют легированные волокна с высокой радиационной стойкостью.

Основными элементами оптоэлектронных систем являются источники света (лазеры, светоизлучающие диоды), оптические среды (активные и пассивные), фотоприемники.

Волоконно-оптическая система передачи (ВОСП) – это совокупность оптических устройств и оптических линий передачи для создания, обработки и передачи оптических сигналов. Упрощенная структурная схема ВОСП представлена на рисунке 12.1.

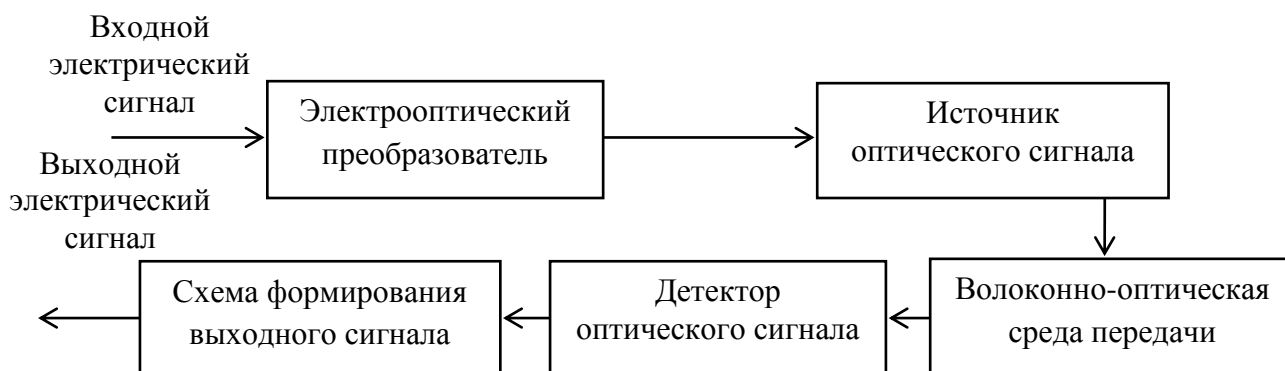


Рисунок 12.1 – Упрощенная структурная схема волоконно-оптической системы передачи

Компоненты ВОСП связи делятся на пассивные и активные.

Основной средой передачи является оптическое волокно.

Как правило, оптические волокна производят из оптического стекла.

Оптическое стекло – однородное стекло, предназначенное для изготовления прозрачных элементов оптических систем [4].

Оптические стекла изготавливают на основе оксида кремния (SiO_2), солей бария, оксида свинца, оксида германия, органических материалов – полиметилметакрилата, минералоорганического стекла.

Основное требование к оптическому стеклу – неизменность фронта световой волны при ее распространении в толще оптического стекла. Это достигается благодаря его высокой физической и химической однородности.

В зависимости от назначения различают бесцветное, цветное и люминесцирующее оптическое стекло.

Высокопрозрачное бесцветное стекло нормируется по показателю преломления и, как правило, предназначено для использования в оптических системах, формирующих изображение.

Приняты три основные характеристики оптического стекла:

1) показатель преломления n_e для зеленой линии ртути ($\lambda_e = 546,07$ нм);

2) средняя дисперсия $n_F - n_C$, где n_F и n_C – соответственно показатели преломления синей и красной линий кадмия ($\lambda_F = 479,99$ нм; $\lambda_C = 643,85$ нм);

3) коэффициент дисперсии (коэффициент Аббе)

$$v_e = \frac{(n_e - 1)}{(n_F - n_C)}. \quad (12.1)$$

В зависимости от значения этих характеристик оптические стекла делят на типы (известно около 120 типов с разным химическим составом).

Разнообразие типов оптических стекол позволяет рассчитывать светосильные оптические системы без аберраций (можно устранить хроматические аберрации).

Цветное оптическое стекло используется в оптических системах для поглощения света в требуемом спектральном диапазоне.

Люминесцирующее оптическое стекло (генерирующее) предназначено для использования в качестве активной среды твердотельных лазеров. Такое оптическое стекло нормируется по виду и концентрации активатора, времен за- тухания люминесценции, коэффициенту поглощения на определенной длине волны излучения и по степени однородности.

При современной технологии изготовления емкость волокна (эквивалентная битовой скорости) может достигать 10 Гбит/с в расчете на один битовый поток. Используя при этом технологию волнового мультиплексирования, можно пропустить по одному волокну не менее 80 таких потоков (в настоящее время – 320). Эквивалентная емкость составляет минимум 800 Гбит/с.

К основным параметрам оптического волокна относятся число и структура распространяющихся мод, профиль показателя преломления, числовая

апертура, геометрические размеры сердцевины и оболочки, затухание и дисперсия [15].

На рисунке 12.2 показано распространение света в волоконном световоде.

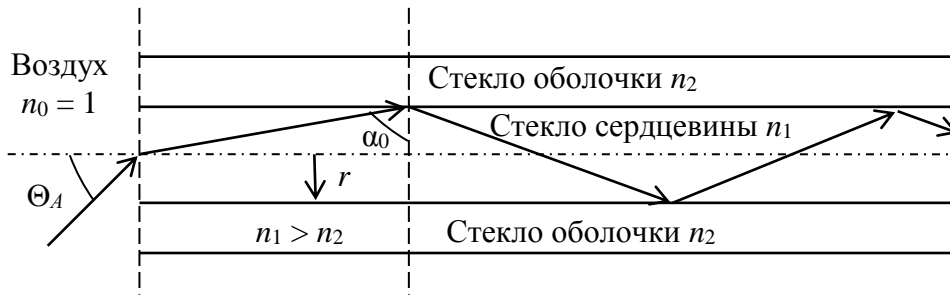


Рисунок 12.2 – Распространение света в волоконном световоде

Для предотвращения перехода энергии в оболочку и излучения в окружающее пространство необходимо соблюдать условие полного внутреннего отражения и апертуру.

Апертура – телесный угол Θ_A между оптической осью и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец волоконного световода, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения.

При переходе из среды с большим показателем преломления (n_1) в среду с меньшим показателем преломления (n_2), т. е. при $n_1 > n_2$, волна при определенном угле падения на границу раздела сред полностью отражается и не переходит в другую среду в виде преломленных лучей, т. е. выполняется условие полного внутреннего отражения.

Угол падения α_0 , начиная с которого вся энергия отражается от границы раздела двух сред, называется углом **полного внутреннего отражения**:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_2}{\mu_1 \varepsilon_1}}, \quad (12.2)$$

где μ_1, μ_2 – магнитная проницаемость сердцевины и оболочки соответственно;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – диэлектрическая проницаемость сердцевины и оболочки соответственно.

Этот телесный угол Θ_A характеризуется **числовой апертурой NA**:

$$NA = \sin \Theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (12.3)$$

Из-за нарушения полного внутреннего отражения возникают потери на границе сердцевины и оболочки, что может происходить из-за дефектов границы раздела двух сред, а также из-за изгибов оптоволокон. Потери на изгибах оптоволокон пропорциональны $\exp(R/R_C)$ [16], где R – радиус изгиба, R_C – критический радиус:

$$R_C \approx \frac{a}{(NA)^2} = \frac{a}{2n\Delta n}, \quad (12.4)$$

где a – диаметр сердцевины оптоволокон;

NA – числовая апертура.

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2}; \quad (12.5)$$

$$\Delta n = n_1 - n_2. \quad (12.6)$$

Отсюда следует, что затухание из-за изгибов оптоволокна может проявляться только при малых радиусах кривизны, когда они сравнимы с критическим радиусом.

Можно определить **относительное значение показателя преломления оптического волокна Δ** :

$$\Delta = \frac{(NA)^2}{2n_1} = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1}. \quad (12.7)$$

Если показатель преломления n волоконного световода является функцией радиуса r , то определяют **профиль показателя преломления сердцевинны**. Он описывает радиальное изменение показателя преломления от оси волокна в стекле сердцевинны в направлении стекла оболочки: $n = f(r)$.

От формы этого профиля зависит распределение мод в волноводе.

Для практического применения важными являются профили, описываемые степенными функциями:

$$n_r = n_0 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^k} \quad \text{для } r < a \text{ (для сердцевинны);} \quad (12.8)$$

$$n^2(r) = n_2^2 = \text{const для } r \geq a \text{ (в оболочке),} \quad (12.9)$$

где n_0 – показатель преломления в центре сердцевинны;

r – расстояние от оси оптического волокна, мкм;

a – радиус сердцевинны, мкм.

При $k \rightarrow \infty$ (ступенчатый профиль) показатель преломления сердцевинны остается постоянным.

Все остальные профили называются градиентными.

Например, распределение показателя преломления по радиусу в сердцевинне градиентного волокна $n(r)$ представляется в виде степенной функции [17]

$$n(r) = n_1(0) \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^m \right]^{1/2}, \quad (12.10)$$

где $n_1(0)$ – показатель преломления сердцевинны на оси волокна.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (12.11)$$

где n_2 – показатель преломления оболочки.

При $m = 2$ распределение показателя преломления является параболическим, а при $m \rightarrow \infty$ приближается к ступенчатому.

Нормированная частота V рассчитывается по формуле

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} NA. \quad (12.12)$$

Если нормированная частота $V \leq 2,045$, то реализуется одномодовый режим. Чем меньше разность $\Delta n = n_1 - n_2$, тем при большем радиусе световода обеспечивается одномодовый режим.

Критическая длина волны $\lambda_{кр}$ и частота $f_{кр}$ рассчитываются следующим образом:

$$\lambda_{кр} = \frac{\pi d}{P_{nm} \cdot n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (12.13)$$

$$f_{кр} = \frac{P_{nm} \cdot c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}. \quad (12.14)$$

Параметры P_{nm} сведены в справочные таблицы и характеризуют тип волны (моду, E_{nm} , H_{nm}).

По оптическим волокнам возможна передача электромагнитных волн длиной меньше критической.

12.2 Основные рекомендации к решению задач

12.2.1 Изучить параметры оптических стекол.

12.2.2 Изучить основные параметры оптических волокон.

12.2.3 При решении задач учесть единицы измерения величин, входящих в расчетные формулы.

12.3 Задачи для самостоятельного решения

12.3.1 Определить, во сколько раз скорость света в оптоволокне с коэффициентом преломления n_1 отличается от скорости света в оптоволокне с коэффициентом преломления n_2 (таблица 12.1).

Таблица 12.1 – Значения показателей преломления материалов оптоволокна

Вариант	n_1	n_2	Вариант	n_1	n_2
1	1,6126	1,5606	16	1,806	1,4874
2	1,806	1,7172	17	1,7172	1,4781
3	1,806	1,755	18	1,4903	1,4874
4	1,7172	1,6126	19	1,6126	1,7172
5	1,4903	1,4874	20	1,7172	1,4781
6	1,5688	1,4781	21	1,755	1,4781
7	1,7172	1,4874	22	1,806	1,4781
8	1,755	1,7172	23	1,806	1,5606
9	1,806	1,4781	24	1,806	1,7172
10	1,806	1,4781	25	1,806	1,755
11	1,7172	1,4781	26	1,7172	1,4874
12	1,7172	1,5606	27	1,755	1,4781

Продолжение таблицы 12.1

Вариант	n_1	n_2	Вариант	n_1	n_2
13	1,755	1,7172	28	1,7172	1,4874
14	1,7172	1,755	29	1,806	1,7172
15	1,806	1,6126	30	1,806	1,4781

12.3.2 Излучение какой длины волны необходимо направить на оптический волновод, чтобы соблюдалось условие полного внутреннего отражения? Углы падения заданы в таблице 12.2. Рассчитать угол полного внутреннего отражения, апертуру и относительное значение показателя преломления оптического волокна.

Таблица 12.2 – Параметры оптоволокна и углы падения

Вариант	α , град	n_1 (сердцевины)	n_2 (оболочки)
1	40	1,6126	1,5606
2	45	1,806	1,7172
3	55	1,806	1,755
4	60	1,7172	1,6126
5	40	1,4903	1,4874
6	45	1,5688	1,4781
7	55	1,7172	1,4874
8	60	1,755	1,7172
9	20	1,806	1,4781
10	35	1,806	1,4781
11	10	1,7172	1,4781
12	55	1,7172	1,5606
13	60	1,755	1,7172
14	40	1,806	1,755
15	45	1,806	1,6126
16	55	1,7172	1,4874
17	60	1,6126	1,4781
18	40	1,806	1,4781
19	45	1,806	1,5606
20	55	1,7172	1,5606
21	40	1,5606	1,4781
22	45	1,6126	1,4781
23	60	1,7172	1,5606
24	65	1,755	1,7172
25	55	1,806	1,4781
26	45	1,806	1,5606
27	60	1,806	1,7172

Продолжение таблицы 12.2

Вариант	α , град	n_1 (сердцевины)	n_2 (оболочки)
28	55	1,806	1,755
29	45	1,7172	1,6126
30	40	1,4903	1,4874

12.3.3 Рассчитать коэффициент дисперсии оптических стекол, параметры которых заданы в таблице 12.3.

Таблица 12.3 – Показатели преломления для зеленой линии ртути, синей и красной линий кадмия

Вариант	n_e	n_F	n_C
1	1,4874	1,49227	1,48531
2	1,4903	1,49558	1,48805
3	1,4781	1,48319	1,47590
4	1,5688	1,5797	1,56582
5	1,5606	1,56738	1,55777
6	1,6126	1,62	1,6095
7	1,5181	1,52428	1,51549
8	1,7172	1,73468	1,71037
9	1,755	1,77476	1,74733
10	1,806	1,82894	1,79716
11	1,5294	1,53662	1,5264
12	1,49227	1,48531	1,4874
13	1,49558	1,48805	1,4903
14	1,48319	1,47590	1,4781
15	1,5797	1,56582	1,5688
16	1,56738	1,55777	1,5606
17	1,62	1,6095	1,6126
18	1,52428	1,51549	1,5181
19	1,73468	1,71037	1,7172
20	1,77476	1,74733	1,755
21	1,82894	1,79716	1,806
22	1,53662	1,5264	1,5294
23	1,62	1,6095	1,6126
24	1,56738	1,55777	1,5606
25	1,4874	1,49227	1,48531
26	1,4903	1,49558	1,48805
27	1,4781	1,48319	1,47590
28	1,73468	1,71037	1,7172
29	1,77476	1,74733	1,755
30	1,5294	1,53662	1,5264

12.3.4 Вывести формулу и рассчитать минимальный радиус изгиба оптоволокна, чтобы выполнялось условие полного внутреннего отражения. Минимальное отклонение угла полного внутреннего отражения может быть $\Delta\alpha$, радиус сердечника r , толщина оболочки l (таблица 12.4).

Таблица 12.4 – Параметры оптического волокна

Вариант	n_e	n_F	n_C	$\Delta\alpha$, град	r , мкм	l , мкм
1	1,5181	1,52428	1,51549	0,1	2	0,8
2	1,7172	1,73468	1,71037	0,2	2,2	0,9
3	1,755	1,77476	1,74733	0,3	2,3	0,3
4	1,806	1,82894	1,79716	0,4	2,5	0,4
5	1,5294	1,53662	1,5264	1	1,5	0,5
6	1,4781	1,48319	1,47590	2	1,7	0,8
7	1,5688	1,5797	1,56582	3	1,6	0,9
8	1,5606	1,56738	1,55777	1,4	1,9	0,3
9	1,4874	1,49227	1,48531	0,8	2,1	0,4
10	1,4903	1,49558	1,48805	0,9	2,7	0,5
11	1,4781	1,48319	1,47590	1,2	3	0,2
12	1,5181	1,806	1,51549	0,1	1,5	0,9
13	1,7172	1,73468	1,71037	0,2	1,7	0,3
14	1,755	1,77476	1,74733	0,3	1,6	0,4
15	1,806	1,82894	1,79716	0,4	1,9	0,5
16	1,5294	1,53662	1,5264	1	2,1	0,8
17	1,4781	1,48319	1,47590	2	2,7	0,9
18	1,5688	1,5797	1,56582	3	3	0,3
19	1,5606	1,5797	1,55777	1,4	2	0,8
20	1,4874	1,56738	1,48531	0,8	2,2	0,9
21	1,4903	1,49227	1,48805	0,9	2,3	0,3
22	1,4781	1,49558	1,47590	1,2	2,5	0,4
23	1,7172	1,73468	1,71037	0,1	1,5	0,3
24	1,755	1,77476	1,74733	0,2	1,7	0,4
25	1,806	1,82894	1,79716	0,3	1,6	0,5
26	1,806	1,82894	1,79716	0,4	1,9	0,2
27	1,5294	1,53662	1,5264	1	2,1	0,9
28	1,4781	1,48319	1,47590	2	2,7	0,3
29	1,806	1,82894	1,79716	3	3	0,4
30	1,4781	1,49558	1,47590	1,4	2	0,5

13 ПАРАМЕТРЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ. ЗАТУХАНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

13.1 Краткие теоретические сведения

Основные потери в световодах могут быть вызваны потерями на границе сердцевины и оболочки, рассеянием на нерегулярностях, поглощением из-за примесей, поглощением и рассеянием в материале волокна (внутренние потери), а также внешними потерями (апертурные и френелевские потери).

Если ширина диаграммы направленности источника излучения и апертуры волокна не совпадают, возникают так называемые апертурные потери [17].

Френелевские потери возникают из-за отражения части излучения от входного торца волокна [17], однако они не так существенны: при углах падения излучения вплоть до 60° не превышают 0,4–0,6 дБ.

Потери на границе сердцевины и оболочки возникают из-за нарушения полного внутреннего отражения, что может происходить из-за дефектов границы раздела двух сред, а также из-за изгибов оптоволокна. Потери на изгибах оптоволокна можно определить по формулам (12.4)–(12.6).

Затухание из-за изгибов оптоволокна может проявляться только при малых радиусах кривизны, когда они сравнимы с критическим радиусом.

Потери на поглощение $\alpha_{\text{п}}$ состоят из собственного поглощения (проявляющегося при идеальной структуре материала) и поглощения из-за наличия в стекле ионов металлов переходной группы Fe^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} и ионов гидроксильной группы ОН. Механизм этих потерь связан с поведением диэлектрика в электрическом поле (диэлектрической поляризацией):

$$\alpha_{\text{п}} = 8,69 \frac{\pi \cdot n_1 \cdot \text{tg}\delta}{\lambda}, \text{ дБ/км}, \quad (13.1)$$

где n_1 – показатель преломления сердцевины оптоволокна;

$\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь сердцевины оптоволокна (изменяется от 10^{-12} до $2 \cdot 10^{-11}$);

λ – длина волны излучения, км.

Эта составляющая поглощения линейно растет с частотой и существенно зависит от свойств материала волокна ($\text{tg}\delta$). Она характеризует нижний предел поглощения для данного материала и становится значимой в ультрафиолетовой и инфракрасной областях.

Рэлеевское рассеяние света – когерентное рассеяние на оптических неоднородностях, размеры которых значительно меньше длины волны возбуждающего света.

Величина затухания из-за рэлеевского рассеяния света $\alpha_{\text{р}}$ определяется следующим образом:

$$\alpha_{\text{р}} = 4,43 \frac{8\pi^3 (n_1^2 - 1)}{3\lambda^4} \cdot k \cdot \beta \cdot T \cdot 10^3, \quad (13.2)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

β – коэффициент сжимаемости (для кварца) ($\beta = 8,1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$);

T – температура затвердевания стекла при вытяжке ($T = 1500 \text{ К}$).

Дополнительные затухания в оптическом кабеле обусловлены кабельными потерями α_k и состоят по крайней мере из семи видов парциальных коэффициентов затухания:

- α_1 – затухание вследствие приложения в оптоволокне термомеханических воздействий в процессе изготовления кабеля;

- α_2 – затухание из-за температурной зависимости показателя преломления материала оптоволокна;

- α_3 – затухание, вызываемое микроизгибами оптоволокна;

- α_4 – затухание вследствие нарушения прямолинейности оптоволокна (скрутка);

- α_5 – затухание вследствие кручения оптоволокна относительно его оси (осевые напряжения скручивания);

- α_6 – затухание вследствие неравномерности покрытия оптоволокна;

- α_7 – затухание вследствие потерь в защитной оболочке оптоволокна.

Например, затухание, вызванное микроизгибами волокна, можно вычислить следующим образом:

$$\alpha_3 = k_3 \cdot N_n \cdot Y_n^2 \frac{a^4}{\Delta^3 \cdot b^6} \left(\frac{E_o}{E_c} \right)^{3/2}, \quad (13.3)$$

где $k_3 = 0,9 \dots 1,0$;

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

a – радиус сердцевинны оптоволокна;

b – диаметр оболочки оптоволокна;

$\Delta = \frac{n_1}{n_2}$ – относительное значение показателя преломления оптоволокна;

E_o, E_c – модули Юнга оболочки и сердцевинны волокна соответственно.

Зависимость коэффициента преломления чистого кварца от длины волны излучения описывается формулой Селмейера:

$$n^2 - 1 = \frac{1,6961 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (0,0684)^2} + \frac{0,4079 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (0,1162)^2} + \frac{1,8974 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (2,2026)^2}. \quad (13.4)$$

Общее затухание определяется суммой парциальных затуханий и рассчитывается по формуле

$$\alpha = \sum_{i=1}^7 \alpha_i. \quad (13.5)$$

Кроме того, общее затухание α можно определить, измерив мощность светового потока на входе ($P_{\text{вх}}$) и выходе оптоволокна ($P_{\text{вых}}$):

$$\alpha = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (13.6)$$

Затухание, приведенное к единице длины волокна, определяется как

$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}, \quad (13.7)$$

где L – длина волокна.

13.2 Основные рекомендации к решению задач

13.2.1 Изучить источники затуханий в оптических волокнах и их влияние на прохождение сигнала в волоконно-оптических линиях связи.

13.2.2 Усвоить физический смысл контролируемых параметров.

13.2.3 При решении задач оценить относительную погрешность измерения затухания.

13.3 Задачи для самостоятельного решения

13.3.1 Определить общее затухание в оптоволокне с показателем преломления сердцевины n_1 , коэффициентом сжимаемости β , тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ оптического сигнала частоты f , температурой затвердевания материала сердцевины T (таблица 13.1). Относительная погрешность измерения частоты $2 \cdot 10^{-3}$.

Таблица 13.1 – Значения параметров оптического волокна

Вариант	n_1	$\beta, \%$	$\text{tg}\delta$	$F, \text{Гц}$	$T, \text{К}$
1	1,806	$5 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{11}$	1500
2	1,7172	$10 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{12}$	1550
3	1,4903	$15 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{11}$	1450
4	1,7172	$6 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{15}$	1500
5	1,7172	$8 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{16}$	1550
6	1,755	$9 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{11}$	1450
7	1,806	$12 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{13}$	1500
8	1,5688	$13 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{14}$	1550
9	1,6126	$3 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{15}$	1450
10	1,806	$6 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{13}$	1550
11	1,806	$8 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{16}$	1450
12	1,5606	$8,9 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{11}$	1500
13	1,7172	$6,8 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{11}$	1400
14	1,755	$6,5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{11}$	1450
15	1,6126	$8,3 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{11}$	1450
16	1,4874	$7,1 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{11}$	1400
17	1,4781	$9,1 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{11}$	1500
18	1,4874	$8,7 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{11}$	1400
19	1,7172	$8,2 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{11}$	1400
20	1,4781	$7,9 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{11}$	1500

Продолжение таблицы 13.1

Вариант	n_1	$\beta, \%$	$\text{tg}\delta$	$F, \text{Гц}$	$T, \text{К}$
21	1,4781	$7,4 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{11}$	1450
22	1,5606	$8,9 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{11}$	1500
23	1,806	$5 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{11}$	1500
24	1,7172	$10 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{12}$	1550
25	1,806	$12 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{13}$	1500
26	1,5688	$13 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{14}$	1550
27	1,4781	$9,1 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{11}$	1500
28	1,5688	$13 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{14}$	1550
29	1,6126	$3 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{15}$	1450
30	1,755	$9 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{11}$	1450

13.3.2 Рассчитать, сколько неоднородностей на единицу длины допускается в оптоволокне с радиусом сердцевины r_1 , радиусом оболочки r_2 , показателями преломления сердцевины и оболочки соответственно n_1 и n_2 и относительным значением модулей Юнга сердцевины и оболочки k , чтобы затухание сигнала в нем было α (таблица 13.2).

Таблица 13.2 – Параметры оптоволокна

Вариант	n_1	n_2	$r_1, \text{мм}$	$r_2, \text{мм}$	k	$\alpha, \text{дБ}$
1	1,806	1,7172	2	2,5	1,1	1,0
2	1,7172	1,5606	2,2	2,7	1,2	1,2
3	1,755	1,4903	2,3	2,9	1,7	1,3
4	1,7172	1,6126	2,5	2,8	1,5	1,4
5	1,7172	1,4874	1,5	1,8	1,1	1,0
6	1,755	1,4781	1,7	2,7	1,2	1,2
7	1,806	1,4874	1,6	1,9	1,7	1,3
8	1,7172	1,5688	1,9	2,9	1,5	1,4
9	1,6126	1,4781	2,1	2,8	1,2	1,2
10	1,806	1,4781	2,7	2,9	1,7	1,3
11	1,806	1,4781	3	3,3	1,5	1,4
12	1,7172	1,5606	1,5	2,5	1,1	1,0
13	1,7172	1,4874	1,2	2,7	1,2	1,4
14	1,755	1,4781	2,1	2,8	1,7	1,4
15	1,6126	1,4874	2,7	2,9	1,5	1,4
16	1,755	1,4874	1,2	1,8	1,1	1,6
17	1,7172	1,4781	1,5	1,8	1,2	1,5
18	1,6126	1,4874	1,5	2,7	1,7	1,4
19	1,7172	1,5606	1,2	2,8	1,5	1,7
20	1,755	1,4781	2,1	2,9	1,2	1,8

Продолжение таблицы 13.2

Вариант	n_1	n_2	r_1 , мм	r_2 , мм	k	α , дБ
21	1,7172	1,4781	2,7	2,9	1,7	1,4
22	1,806	1,4874	1,6	1,9	1,7	1,3
23	1,6126	1,4781	2,1	2,8	1,2	1,2
24	1,806	1,4781	2,7	2,9	1,7	1,3
25	1,755	1,4781	1,2	2,8	1,5	1,7
26	1,6126	1,4874	2,1	2,9	1,2	1,8
27	1,806	1,7172	2	2,5	1,1	1,0
28	1,7172	1,5606	2,2	2,7	1,2	1,2
29	1,755	1,4781	2,1	2,8	1,7	1,4
30	1,6126	1,4874	2,7	2,9	1,5	1,4

13.3.3 Зависимость коэффициента преломления чистого кварца от длины волны излучения описывается формулой Селмейера (13.4). Определить показатель преломления кварца на рабочих частотах, значения которых приведены в таблице 13.3. Относительная погрешность установки частоты равна $2 \cdot 10^{-5}$.

Таблица 13.3 – Рабочие частоты излучения в оптоволокне

Длина волны λ , нм	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1600	1300	1350	1480	1560	1700	1750	1300	1280	1500

Продолжение таблицы 13.3

Длина волны λ , нм	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	1350	1600	1560	1280	1600	1560	1280	1300	1350	1300

Продолжение таблицы 13.3

Длина волны λ , нм	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	1350	1600	1600	1280	1600	1560	1280	1300	1350	1560

14 ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ

14.1 Краткие теоретические сведения

Оптическое излучение, используемое в качестве носителя информации в волоконно-оптических линиях передачи, представляет собой электромагнитные волны в диапазоне частот $3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{17}$ Гц. Сюда относятся диапазоны инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов. Скорость распространения оптического излучения зависит от характеристик среды распространения. Отношение скорости распространения света в вакууме и в среде определяет ее показатель преломления, причем он будет в общем случае зависеть от длины волны светового излучения. Данный эффект приводит к дисперсии оптического излучения, или рассеянию излучения в материале сердцевины оптоволокна.

В зависимости от особенностей испускания излучения атомами или молекулами различают тепловое излучение и люминесценцию; по степени однородности спектрального состава – монохроматическое и немонахроматическое излучение; по упорядоченности ориентации векторов электрического и магнитного полей – естественное (неполяризованное), поляризованное линейно, по кругу или эллиптически; по рассеянию потока излучения – направленное, диффузное, смешанное [4].

Падающий на торец оптоволокна световой поток частично отражается от торца, частично проходит по оптоволокну и частично поглощается в нем. Поглощенная часть энергии преобразуется главным образом в теплоту, а также может вызывать фотоэлектронную эмиссию, фотолюминесценцию, фотохимические превращения.

Тепловым называется излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии. Тепловое излучение имеет сплошной спектр, положение максимума которого зависит от температуры вещества.

С повышением температуры максимум перемещается в область малых длин волн. Тепловое излучение испускается всеми телами при любых температурах, отличных от нуля.

Излучательной способностью тела $\varepsilon(\omega, T)$ называют поверхностную плотность мощности теплового излучения тела в единичном интервале частот. Она зависит от температуры T , частоты ω , материала и состояния излучающей поверхности [17].

Поглощательной способностью тела $\alpha(\omega, T)$ называют долю мощности, падающей на единицу поверхности в единичном интервале частот, поглощаемую телом [17].

Абсолютно черное тело (АЧТ) – это тело, способное поглощать при любой температуре все падающее на него излучение во всем диапазоне частот (поглощательная способность равна единице) [17]:

$$\alpha_{\text{АЧТ}}(\omega, T) = 1, \tag{14.1}$$

где ω – частота излучения;

T – термодинамическая температура.

АЧТ имеет максимальную излучательную способность.

Отношение излучательной способности любого тела к его поглотительной способности равно излучательной способности АЧТ:

$$\frac{\varepsilon(\omega, T)}{\alpha(\omega, T)} = \varepsilon_{\text{АЧТ}}(\omega, T). \quad (14.2)$$

Все тела, отличающиеся по характеру излучения от АЧТ, условно делятся на серые и селективные. Тело называется **серым**, если его поглотительная способность одинакова для всех частот и зависит только от температуры, материала и состояния его поверхности. Тела, поглотительная способность которых зависит от температуры и частоты, называются **селективными** [17].

Интегральная излучательная способность тела $\varepsilon(T)$ – энергия, излучаемая с единицы поверхности в заданном интервале длин волн:

$$\varepsilon(T) = \int_0^{\infty} \varepsilon(\omega, T) d\omega. \quad (14.3)$$

Используя соотношение (14.2), получим

$$\varepsilon(T) = \int_0^{\infty} \alpha(\omega, T) \varepsilon_{\text{АЧТ}}(\omega, T) d\omega = \alpha(T) \cdot \varepsilon_{\text{АЧТ}}(T). \quad (14.4)$$

Интегральная степень черноты тела – отношение интегральных излучательных способностей реального и абсолютно черного тела, которое изменяется от 0 до 1:

$$\alpha(T) = \frac{\varepsilon(T)}{\varepsilon_{\text{АЧТ}}(T)}. \quad (14.5)$$

Спектральная плотность энергии равновесного излучения в единице объема $u(\omega)$ – энергия излучения в единице объема, приходящаяся на единичный интервал частот. Она определяется формулой Планка:

$$u(\omega) = g(\omega) \cdot f(\omega, T) \cdot h\omega = \frac{h\omega^3}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\omega}{kT}} - 1}, \quad (14.6)$$

где k – постоянная Больцмана;

$h\omega$ – энергия фотона;

$g(\omega)$ – плотность состояний поля;

$f(\omega, T)$ – вероятность заполнения состояний фотонами, задаваемая функцией Бозе – Эйнштейна:

$$f(\omega, T) = \frac{1}{e^{\frac{h\omega}{kT}} - 1}. \quad (14.7)$$

Формула Планка справедлива при любых температурах и для любых частот, поэтому из нее следуют все законы теплового излучения.

Интегральная по спектру плотность теплового излучения u определяется следующим образом:

$$u = \int_0^{\infty} u(\omega) d\omega. \quad (14.8)$$

Полная мощность равновесного излучения P пропорциональна четвертой степени температуры (согласно закону Стефана – Больцмана):

$$P = \sigma \cdot T^4, \quad (14.9)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² · К⁴).

Радиационной температурой T_r источника излучения называется температура АЧТ, при которой интегральная его излучательная способность равна интегральной излучательной способности данного источника.

Термодинамическая и радиационная температуры тела связаны следующим соотношением:

$$T_r = \sqrt{\alpha(T)} \cdot T, \quad (14.10)$$

где $\alpha(T)$ – интегральная степень черноты тела.

Так как $\alpha(T) \leq 1$, радиационная температура источника всегда меньше его термодинамической температуры.

Цветовой температурой T_c теплового источника называют такую температуру АЧТ, при которой спектральное распределение излучения АЧТ наиболее близко к спектральному распределению излучения данного источника [17]:

$$T_c = b / \lambda_{\max}, \quad (14.11)$$

где λ_{\max} – длина волны, соответствующая максимуму излучения данного источника.

Яркостной температурой T_b источника называют такую температуру АЧТ, при которой его излучательная способность при заданной частоте равна излучательной способности данного источника:

$$\varepsilon_{\text{АЧТ}}(\omega_0, T_{\text{АЧТ}}) = \varepsilon(\omega_0, T), \quad (14.12)$$

где T – термодинамическая температура источника.

В соответствии с законом Кирхгофа

$$\alpha(\omega_0, T) = \frac{\varepsilon_{\text{АЧТ}}(\omega_0, T_{\text{АЧТ}})}{\varepsilon_{\text{АЧТ}}(\omega_0, T)}. \quad (14.13)$$

Поскольку для нечерных тел $\alpha(\omega_0, T) < 1$, то $\varepsilon_{\text{АЧТ}}(\omega_0, T_b) < \varepsilon_{\text{АЧТ}}(\omega_0, T)$, и яркостная температура всегда меньше термодинамической температуры источника.

Энергетическая освещенность (облученность) поверхности E_3 на расстоянии L от точечного источника рассчитывается как

$$E_3 = \frac{I}{L^2} \cdot \cos \gamma, \quad (14.4)$$

где I – интенсивность излучения источника;

γ – угол падения излучения.

Если модель АЧТ представляет собой сферическую полость диаметра D с отверстием диаметра d , а коэффициент отражения внутренней поверхности полости равен ρ , то при условии равномерного нагрева внутренней полости и при пренебрежении многократными отражениями ее облученность равна [17]

$$E_э = \frac{\Phi_{отр}}{S}, \quad (14.5)$$

где $\Phi_{отр}$ – отраженный лучистый поток;

S – площадь внутренней поверхности сферы.

Через отверстие в полости выйдет лучистый поток

$$\Phi_1 = E_э \cdot S_0, \quad (14.6)$$

где S_0 – площадь отверстия.

Излучательная (ε) и поглощательная (α) способности модели равны

$$\varepsilon = \alpha = \Phi_{погл}/\Phi_{пад}. \quad (14.7)$$

Излучение АЧТ используется в оптоэлектронике для калибровки источников и приемников излучения. Наиболее совершенной моделью АЧТ является небольшое отверстие в непрозрачной стенке замкнутой полости, находящейся при заданной температуре.

14.2 Основные рекомендации к решению задач

14.2.1 Изучить свойства оптического излучения, особенности его передачи по оптоволокну и его влияние на свойства среды передачи.

14.2.2 При решении задач использовать физический смысл влияющих величин и расчетные формулы, приведенные в параграфе 14.1.

14.3 Задачи для самостоятельного решения

14.3.1 Плотность энергии u связана с мощностью P_0 , испускаемой с единицы поверхности в единичный телесный угол, следующим образом:

$$u = \frac{4\pi}{c} \cdot P_0. \quad (14.8)$$

Полная мощность, испускаемая с единицы поверхности в полусферу, равна $P = \pi P_0$.

Проинтегрировав выражение (14.8), получить формулу, выражающую закон Стефана – Больцмана.

14.3.2 Получить выражение для мощности, излучаемой с единицы поверхности АЧТ в полусферу, в зависимости от длины волны.

14.3.3 Определить, чему равны коэффициенты отражения, поглощения и пропускания: 1) непрозрачного тела, 2) абсолютно черного тела, 3) абсолютно белого тела, 4) абсолютно прозрачного тела, 5) серого тела.

14.3.4 Каким должен быть диаметр отверстия сферической полости с диаметром D и коэффициентом отражения внутренней поверхности ρ , чтобы достичь отражательной способности этой полости μ (таблица 14.1)?

Таблица 14.1 – Параметры сферической полости

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D , мм	94	76	48	26	67	59	31	80	44	61
ρ	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
μ , %	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6

Продолжение таблицы 14.1

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
D , мм	74	71	66	96	88	17	39	40	54	21
ρ	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
μ , %	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6

Продолжение таблицы 14.1

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
D , мм	99	36	84	46	63	54	81	90	49	91
ρ	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
μ , %	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6

15 ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

15.1 Краткие теоретические сведения

Высокая эффективность и способность волоконно-оптических линий передачи передавать огромные потоки информации требуют применения миниатюрных и легкоуправляемых источников высоконаправленного когерентного квазимонохроматического излучения. Этим требованиям удовлетворяют лазеры (лазерные диоды) и светоизлучающие диоды [15].

К лазерному источнику излучения, применяемому для связи, предъявляются следующие требования:

- непрерывный режим работы при температуре не ниже комнатной;
- срок службы не менее 10^5 – 10^6 часов;
- низкий пороговый ток;
- широкая полоса модуляции и обеспечение простоты ее реализации;
- линейная зависимость выходной мощности от тока;
- малая излучающая площадь;
- высокая яркость, монохроматичность;
- стабильность выходной мощности;
- согласование ширины спектра излучения с полосой частотной характеристики волокна и т. д. [15].

Ниже перечислены основные параметры и характеристики светодиодов.

1 Прямое напряжение V_F для заданного значения постоянного или импульсного тока I_F .

2 Обратный ток I_R при заданном значении обратного напряжения V_R .

3 Длина волны максимума излучения λ_M при заданном значении постоянного или импульсного тока.

4 Ширина спектра излучения $\Delta\lambda$ по уровню 0,5 от максимума при том же значении прямого или импульсного тока, что и заданный для случая λ_M .

5 Сила света вдоль геометрической оси при заданном значении постоянного или импульсного тока. Сила света – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучающего кристалла.

6 Яркость L – отношение силы света к площади светящейся поверхности.

7 Угол излучения – величина угла, при котором сила света уменьшается до уровня 0,5 от максимума.

8 Вольт-амперная характеристика с полем допусков.

9 Диаграмма направленности излучения – графическое представление зависимости силы света от угла наблюдения в полярных или прямоугольных координатах.

10 Спектральная диаграмма – графическое представление зависимости силы света от длины волны.

11 Зависимость яркости или силы света от прямого тока (яркостная или световая характеристика).

Основные параметры и характеристики лазеров.

1 Порог генерации – энергия или мощность, поступающая от источника накачки, при которой коэффициент усиления лазерного активного элемента на частоте генерации равен коэффициенту полных потерь в оптическом резонаторе на этой же частоте.

В инжекционных лазерах обычно говорят о пороговом токе или плотности порогового тока, в лазерах с оптической накачкой – о плотности возбуждающего излучения в резонаторе.

Люминесценция начинает усиливаться, как только коэффициент усиления превысит коэффициент внутренних оптических потерь. Для получения генерации необходимо превысить коэффициент полных потерь.

2 Когерентность – согласованное протекание во времени и в пространстве нескольких колебательных и волновых процессов, проявляющееся при их сложении.

Колебания называются когерентными, если разность их фаз остается постоянной или закономерно изменяется во времени и при сложении колебаний определяет амплитуду суммарного колебания.

3 Мощность лазерного излучения:

$$P_{\text{изл}} = \frac{h\nu}{g} f(I - I_t), \quad (15.1)$$

где h – постоянная Планка;

ν – частота лазерного излучения;

$f(I - I_t)$ – функция выхода.

4 Длина резонатора лазера:

$$L = m \left(\frac{\lambda_0}{2n} \right), \quad (15.2)$$

где m – целое число;

λ_0 – длина волны излучения в вакууме;

n – показатель преломления полупроводника.

5 Частота собственных колебаний резонатора:

$$\nu = m \left(\frac{c}{2L} \right). \quad (15.3)$$

Характеристики излучения лазерных источников.

1 Оптическая плотность монохроматического излучения:

$$D_\lambda = -\lg \tau_\lambda, \quad (15.4)$$

где τ_λ – спектральный коэффициент пропускания.

2 Коэффициент пропускания слоя среды (фильтра) толщиной d :

$$\tau_\lambda = 10^{-k_\lambda d} = 10^{-D_\lambda}, \quad (15.5)$$

где k_λ – показатель поглощения, мм^{-1} ;

d – толщина слоя, мм.

За светопоглощение оптического цветного стекла принимается отрицательный десятичный логарифм светопропускания в толщине слоя 1 мм.

3 Оптическая плотность слоя среды (или фильтра) толщиной d :

$$D_\lambda = k_\lambda d, \text{ мм.} \quad (15.6)$$

15.2 Основные рекомендации к решению задач

15.2.1 Изучить особенности конструкции и выходных характеристик лазерных и светодиодных источников излучения.

15.2.2 При решении задач учесть размерность величин, входящих в расчетные формулы.

15.3 Задачи для самостоятельного решения

15.3.1 Рассчитать длину когерентности для натриевой лампы (ширина спектральной линии излучения 10^{10} Гц) и для гелий-неонового лазера (ширина спектральной линии излучения 1 Гц). Длина когерентности $l_k = ct_k = c/\Delta\nu$, где t_k – время когерентности; $\Delta\nu$ – ширина спектральной линии излучения.

15.3.2 Ширина спектральной линии излучения рубинового лазера в 10 тысяч раз шире, чем у газового лазера. Во сколько раз отличаются их длины когерентности?

15.3.3 Энергия импульса излучения лазера на стекле, активированном неодимом, составляет 1000 Дж, время генерации импульса 1 мс. Энергия импульса излучения рубинового лазера составляет 0,5 Дж, время генерации импульса 10 нс. Во сколько раз отличаются средние мощности излучения указанных лазеров?

15.3.4 Чему равно полное число отражений луча оптического квантового генератора до выхода его из резонатора с оптической длиной L_p , состоящего из плоских зеркал, если диаметр активного элемента равен D , а угол падения луча на зеркало равен α (таблица 15.1)?

Таблица 15.1 – Параметры оптического квантового генератора

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_p , мм	24	26	32	44	28	29	32	66	48	50
D , мм	2,0	3,0	2,4	2,9	2,8	3,2	3,3	2,5	2,2	3,1
α , град	45	44	56	60	48	51	57	49	41	53

Продолжение таблицы 15.1

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L_p , мм	28	29	32	66	48	50	24	26	32	44
D , мм	2,0	3,0	2,4	2,9	2,8	3,2	3,3	2,5	2,2	3,1
α , град.	41	53	51	60	48	45	44	56	57	49

Продолжение таблицы 15.1

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
L_p , мм	24	26	32	44	28	29	32	66	48	50
D , мм	2,2	3,1	2,4	2,0	3,0	3,2	3,3	2,5	2,9	2,8
α , град.	45	44	56	60	48	51	57	49	41	53

15.3.5 Максимально допустимая безопасная для глаз плотность энергии излучения рубинового лазера равна $5 \cdot 10^{-7}$ Дж/см². Можно ли без средств защиты глаз наблюдать с расстояния 5 км луч лазерного дальномера на рубине невооруженным глазом и через оптический прибор с увеличением 10^{\times} и коэффициентом пропускания 50 %? Мощность импульса P , длительность импульса τ , расходимость луча 1 мрад, потери излучения в атмосфере составляют 50 %. Считать, что линия визирования совпадает с оптической осью дальномера [18]. Параметры P и τ заданы в таблице 15.2.

Таблица 15.2 – Параметры лазерного дальномера

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P , мВт	5,0	5,2	6,0	5,8	5,7	5,5	6,1	6,5	6,9	5,4
τ , нс	20	22	38	29	30	15	36	27	34	28

Продолжение таблицы 15.2

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P , мВт	5,8	5,7	5,5	6,5	6,9	5,4	5,0	5,2	6,0	5,8
τ , нс	36	27	34	28	20	22	38	29	30	15

Продолжение таблицы 15.2

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
P , мВт	5,5	6,1	6,9	5,4	5,2	6,0	5,7	5,5	5,0	5,2
τ , нс	29	30	15	27	34	28	20	22	38	29

16 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЕМНИКОВ СИГНАЛОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

16.1 Краткие теоретические сведения

Приемники оптического излучения – устройства, преобразующие энергию оптического излучения в другие виды энергии (тепловую электрическую, механическую и т. д.), более удобные для непосредственного измерения.

По виду энергии, в которую преобразуется оптическое излучение, приемники делятся на тепловые, фотоэлектронные, фотоэлектрические и фотохимические. Наиболее часто в волоконно-оптических линиях связи используются фотоэлектронные приемники – фотоэлементы, фотоэлектронные умножители (ФЭУ), электронно-оптические преобразователи. Их действие основано на изменении электрических свойств приемника при поглощении квантов оптического излучения (внутренний фотоэффект).

В полупроводниках фотоэффект заключается в явлении фотопроводимости (изменении сопротивления фотодетектора под действием света) или появлении фотоЭДС при освещении полупроводниковой структуры с одним или несколькими внутренними потенциальными барьерами (фотогальванический эффект) [17].

Ниже перечислены основные параметры фотодетекторов.

1 Световая отдача экрана электронно-оптического преобразователя $\eta_{\text{эк}}$:

$$\eta_{\text{эк}} = \frac{F}{P}, \quad (16.1)$$

где F – световой поток, излучаемый экраном;

P – мощность облучающего светового потока.

2 Коэффициент преобразования электронно-оптического преобразователя η :

$$\eta = \frac{F_{\text{эк}}}{\Phi_{\text{фк}}}, \text{ или } \eta = \frac{\Phi_{\text{эк}}}{\Phi_{\text{фк}}}, \text{ или } \eta = \frac{F_{\text{эк}}}{F_{\text{фк}}}, \quad (16.2)$$

где $F_{\text{фк}}$ и $\Phi_{\text{фк}}$ – световой и лучистый потоки, падающие на фотокатод;

$F_{\text{эк}}$ и $\Phi_{\text{эк}}$ – световой и лучистый потоки, излучаемые экраном по внешнюю полусферу.

3 Лучистый поток – средняя мощность излучения за время, значительно превышающее период колебаний; характеризуется количеством энергии, переносимой электромагнитными волнами в единицу времени через какую-либо поверхность.

4 Световой поток F – мощность оптического излучения; характеризуется вызываемым им световым действием на селективный приемник света:

$$F = k_m \int_0^{\infty} \left(\frac{d\Phi}{d\lambda} \right) \cdot V(\lambda) d\lambda, \quad (16.3)$$

где $V(\lambda)$ – спектральная световая эффективность излучения, т. е. отношение светового потока монохроматического излучения к соответствующему полному световому потоку.

5 Электронно-оптическое увеличение β_3 :

$$\beta_3 = -\frac{D_{\text{эк}}}{D_{\text{фк}}}, \quad (16.4)$$

где $D_{\text{эк}}$ и $D_{\text{фк}}$ – диаметры экрана и фотокатода.

Основные параметры фотокатодов.

1 Интегральная чувствительность $S_{\lambda,m}$ – отношение фототока в мкА к падающему от стандартного источника излучения лучистому потоку в лм:

$$S_{\lambda,m} = \frac{I}{\Phi}. \quad (16.5)$$

2 Абсолютная спектральная чувствительность S_λ :

$$S_\lambda = \frac{I}{F_\lambda}, \text{ или } S_\lambda = \frac{U}{F_\lambda}, \text{ или } S_\lambda = \frac{I}{\Phi_\lambda}, \text{ или } S_\lambda = \frac{U}{\Phi_\lambda}, \quad (16.6)$$

где I , U – реакция приемника (фототок, напряжение), вызываемая монохроматическим световым (F_λ) или лучистым (Φ_λ) потоком.

3 Относительная спектральная чувствительность s_λ :

$$s_\lambda = \frac{S_\lambda}{S_{\lambda m}}, \quad (16.7)$$

где $S_{\lambda m}$ – максимальная абсолютная спектральная чувствительность.

4 Спектральный коэффициент полезного действия приемника k – доля сложного лучистого потока Φ , падающего на приемник, от эффективного для этого приемника потока $\Phi_{\text{эф}}$:

$$k = \frac{\Phi_{\text{эф}}}{\Phi} = \frac{\int_0^\infty S_\lambda r_{\lambda,\tau} d\lambda}{\int_0^\infty r_{\lambda,\tau} d\lambda}. \quad (16.8)$$

5 Эффективный лучистый поток данного приемника $\Phi_{\text{эф}}$ – такой сложный лучистый поток, который при чувствительности приемника, постоянной по всему спектру и равной ее максимальному значению $S_{\lambda m}$, вызывает на его выходе такой же сигнал I или U , какой вызывает весь падающий на него лучистый поток при реальной спектральной чувствительности S_λ [18]:

$$\Phi_{\text{эф}} = \frac{U}{S_{\lambda m}}. \quad (16.9)$$

6 Эффективная полоса чувствительности приемника $\Delta\lambda_{\text{эф}}$ – ширина диапазона спектра, в которой был бы сосредоточен весь эффективный для данного приемника лучистый поток при условии, что в этом интервале спектра спектральная плотность потока излучения постоянна и равна максимальному значению $\Phi_{\lambda m}$ [18].

$$\Delta\lambda_{\text{эф}} = \frac{\Phi_{\text{эф}}}{\Phi_{\lambda m}}. \quad (16.10)$$

7 Квантовая эффективность (квантовый выход) $\eta_{\text{кв}}$ фотоэлектрического приемника:

$$\eta_{\text{кв}} = \frac{N_{\text{ф}}}{N}, \quad (16.11)$$

где $N_{\text{ф}}$ – число квантов, выбивших фотоэлектроны;

N – общее число квантов.

8 Закон сохранения энергии при фотоэффекте выражается соотношением Эйнштейна:

$$\varepsilon = \hbar\omega - \varepsilon_i, \quad (16.12)$$

где ε – кинетическая энергия фотоэлектрона;

ε_i – энергия ионизации атома,

или

$$\varepsilon = \hbar\omega - A, \quad (16.13)$$

где A – работа выхода.

9 Работа выхода Φ – энергия, которую необходимо затратить для удаления из твердого или жидкого вещества в вакуум (в состояние с равной нулю кинетической энергией):

$$\Phi = e \cdot (\varphi_{\text{об}} - \varphi_{\text{вак}}) - \varepsilon_F,$$

где e – заряд электрона;

$\varphi_{\text{вак}}$ – электростатический потенциал в вакууме;

$\varphi_{\text{об}}$ – электростатический потенциал в толще вещества;

ε_F – энергия Ферми.

Абсолютную величину работы выхода измеряют по количеству теплоты, которую нужно подводить к телу при отборе из него термоэмиссионного тока, а в металлах и вырожденных полупроводниках – также по красной границе фотоэлектронной эмиссии.

16.2 Основные рекомендации к решению задач

16.2.1 Изучить принцип и закономерности работы фотоэлектронных преобразователей оптического излучения.

16.2.2 При решении задач учесть размерность величин, входящих в расчетные формулы.

16.3 Задачи для самостоятельного решения

16.3.1 В какой области спектра расположена граница чувствительности серебряно-цезиевого фотокатода, для которого работа выхода равна 3,5 эВ? Кинетическая энергия фотоэлектрона составляет $0,11 \cdot 10^{-19}$ Дж.

$$1 \text{ эВ} = 1,60201 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

16.3.2 По формуле Эйнштейна для внешнего фотоэффекта построить график зависимости энергии фотоэлектронов от частоты падающего излучения. Частоту задать исходя из диапазона частот оптических сигналов. Определить по графику длинноволновую границу фотоэффекта, работу выхода и постоянную Планка.

16.3.3 Рассчитать квантовую пороговую чувствительность фотоумножителя на длине волны максимальной чувствительности. Относительная спектральная чувствительность фотоумножителя S_λ , длина волны λ , диаметр фотокатода d , коэффициент эффективности приемника $\eta_{\text{кв}}$ (таблица 16.1).

Таблица 16.1 – Параметры фотоумножителя

Параметр	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S_λ	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
λ , мкм	0,86	0,80	0,67	0,89	0,91	1,02	1,2	0,65	0,56	0,98
d , мм	10	12	13	12	10	15	16	17	14	18
$\eta_{\text{кв}}$	0,208	0,217	0,280	0,210	0,215	0,209	0,309	0,301	0,210	0,305

Продолжение таблицы 16.1

Параметр	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
S_λ	0,3	0,5	0,6	0,7	0,4	0,4	0,2	0,8	0,9	1,0
λ , мкм	0,65	0,56	0,91	0,98	0,86	0,80	0,67	0,89	1,2	1,1
d , мм	10	12	13	12	10	15	16	17	14	18
$\eta_{\text{кв}}$	0,208	0,217	0,280	0,210	0,215	0,209	0,309	0,301	0,210	0,305

Продолжение таблицы 16.1

Параметр	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
S_λ	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
λ , мкм	0,86	0,80	0,67	0,89	0,91	1,02	1,2	0,65	0,56	0,98
d , мм	10	12	18	15	16	17	14	12	10	15
$\eta_{\text{кв}}$	0,215	0,217	0,280	0,301	0,305	0,209	0,309	0,208	0,210	0,210

16.3.4 Рассчитать интегральную чувствительность фоторезистора по излучателю с температурой 3600 К, для которого коэффициент использования без учета влияния атмосферы равен 0,57. Площадь чувствительного слоя 115 мм², длина волны излучения 2,1 мкм, граничная длина волны 3,2 мкм, напряжение питания 5–30 В, коэффициент эффективности 0,019.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 СТБ 1343–2007. Единая сеть электросвязи Республики Беларусь. Термины и определения. – Введ. 2007–12–01. – Минск : Госстандарт Респ. Беларусь, 2007.
- 2 ГОСТ 16465–70. Сигналы радиотехнические измерительные. – Введ. 1971–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 1971.
- 3 Элементы волноводного тракта : пособие по курсовому и диплом. проектированию / Ю. П. Воропаев [и др.] ; под ред. Ю. С. Гроссмана. – Минск : ВИЗРУ, 1969.
- 4 Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров; редкол.: Д. М. Алексеев [и др.]. – М. : Совет. энцикл., 1984.
- 5 Дерябин, Ю. Д. Основы стандартизации, метрологии и управления качеством техники и вооружения войск ПВО : учебник / Ю. Д. Дерябин, Л. И. Сацункевич, А. М. Ваховский. – М. : Воен. изд-во, 1988.
- 6 ITU-T O.132 Quantizing distortion measuring equipment using a sinusoidal test signal [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <http://itu.int/res/T-REC-0/132-198811-2>.
- 7 Бакланов, И. Г. Методы измерений в системах связи : учеб. пособие / И. Г. Бакланов. – М. : Эко-Трэндз, 1999.
- 8 ITU-T G.821 Параметры качества по ошибкам международного цифрового соединения, работающего при скорости передачи информации в битах ниже магистральной скорости и являющегося частью цифровых сетей с интеграцией служб [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=61857lang.ru>.
- 9 ITU-T G.826 Параметры качества по ошибкам и требования для обеспечения международных работающих с постоянной битовой скоростью цифровых каналов с основной или более высокой скоростью [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=61868lang.ru>.
- 10 ITU-T M.2100 Нормы качественных показателей при вводе в эксплуатацию и техническом обслуживании международных трактов и соединений PDH многих операторов [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: www.analytic.ru/articles/lib236.pdf.
- 11 Канаков, В. А. Новые технологии измерения в цифровых каналах передачи информации : учеб.-метод. материалы по программе повышения квалификации «Соврем. системы мобил. цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации» / В. А. Канаков. – Н. Новгород, 2006.
- 12 Иванов, А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения : пособие / А. Б. Иванов. – М. : Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2000.
- 13 ГОСТ 21879–88. Телевидение вещательное. Термины и определения. – Введ. 1988–12–22. – М. : Изд-во стандартов, 1988.
- 14 ГОСТ 7845–92. Система вещательного телевидения. Основные параметры. Методы измерений. – Введ. 1993–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1992.

15 Манак, И. С. Системы полупроводниковой квантовой электроники : курс лекций / И. С. Манак, В. А. Фираго. – Минск : БГУ, 2007.

16 Гауэр, Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауэр ; пер. с англ. А. И. Ларкина и В. К. Соколова – М. : Радио и связь, 1989.

17 Карих, Е. Д. Оптоэлектроника : учеб. пособие для студентов специальностей «Радиофизика», «Физическая электроника» / Е. Д. Карих. – Минск : БГУ, 2000.

18 Ковальчук, О. С. Сборник вопросов и задач по инфракрасной технике : учеб. пособие / О. С. Ковальчук. – М. : Машиностроение, 1979.

19 ГОСТ 11515–91. Каналы и тракты звукового вещания. Основные параметры качества. Методы измерений. – Введ. 1992–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 1991.

Учебное издание

Дерябина Марина Юрьевна

**КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ
ИНФОКОММУНИКАЦИЙ**
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *А. С. Мигно*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная правка, оригинал-макет *О. И. Толкач*

Подписано в печать 14.12.2022. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 6,0. Тираж 30 экз. Заказ 237.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск