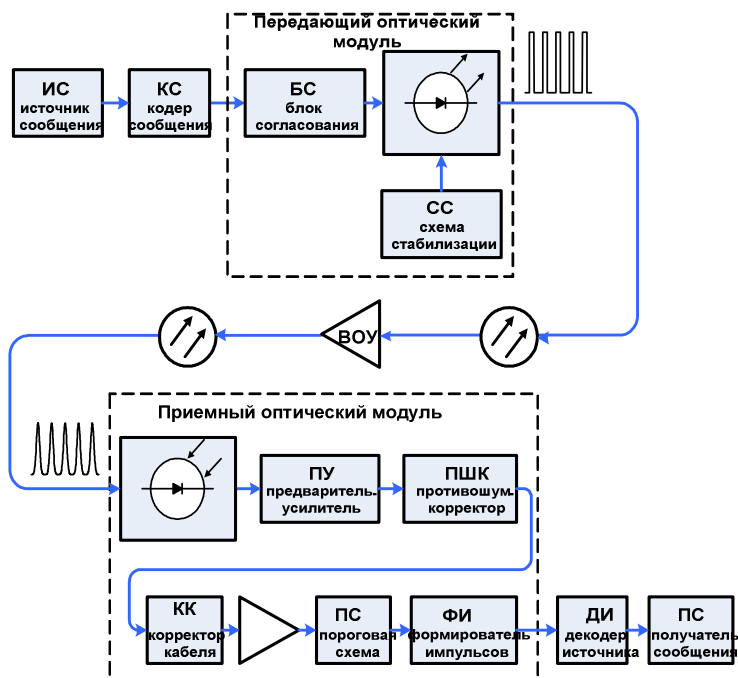


А.П. Коханенко, С.Н. Шарангович

## ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям



Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники**

**А.П. Коханенко, С.Н. Шарангович**

**ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям  
по дисциплине «Оптические цифровые телекоммуникационные  
системы» для студентов специальности 210401 – Физика и техника  
оптической связи

**Томск 2012**

Рекомендовано к изданию кафедрой СВЧиКР Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

УДК 537.8(075.8) + 621.371(075.8)

Рецензент

**Шандаров В.М.** , д-р физ.-мат. наук, проф. каф. СВЧиКР ТУСУРа

**Оптические цифровые телекоммуникационные системы:** учебно-методическое пособие по практическим занятиям// Коханенко А.П., Шارانгович С.Н. / Под ред. С.Н. Шارانговича – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2012. -79 с.

В учебно-методическом пособии приведены основные теоретические материалы по аналого–цифровому преобразованию сигналов и расчёту их параметров при заданной помехозащищённости, преобразованию сигналов в нелинейных кодерах, расчету помехоустойчивости аналоговых и цифровых волоконно-оптических систем передачи. Представлены методические рекомендации и примеры решения типовых задач, приведены задачи для самостоятельного решения.

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям по дисциплине «Оптические цифровые телекоммуникационные системы» предназначено для студентов всех форм обучения по специальности 210401 «Физика и техника оптической связи» направления подготовки 210400 -«Телекоммуникации».

© Коханенко А.П., Шارانгович С.Н., 2012

© Томский гос. ун-т систем управления  
и радиоэлектроники, 2012

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>5</b>
<b>1. Аналого – цифровое преобразование сигнала. Расчёт параметров сигнала при заданной помехозащищённости.....</b>	<b>6</b>
1.1 Основные расчетные формулы и примеры решения задач.....	6
1.2 Задачи для самостоятельного решения.....	15
<b>2. Преобразование сигнала в нелинейном кодере А-типа.....</b>	<b>16</b>
2.1 Основные теоретические сведения .....	16
2.2 Примеры решения задач .....	26
2.3 Задачи для самостоятельного решения .....	30
<b>3. Помехоустойчивость волоконно-оптических систем передачи.....</b>	<b>31</b>
3.1 Основные теоретические сведения .....	31
3.2 Примеры решения задач .....	42
3.3 Задачи для самостоятельного решения.....	51
<b>4. Аналоговые волоконно-оптические системы передачи.....</b>	<b>58</b>
4.1 Основные теоретические сведения .....	58
4.2 Примеры решения задач .....	64
4.3 Задачи для самостоятельного решения.....	68
<b>Список литературы.....</b>	<b>76</b>
<b>Список основных сокращений и обозначений.....</b>	<b>78</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Оптические цифровые телекоммуникационные системы» изучается студентами специальности 210401 «Физика и техника оптической связи» направления подготовки «Телекоммуникации» в 7,8,9 семестрах и относится к блоку специальных дисциплин. В рамках лекционного курса осваивается теоретический материал по учебной литературе [1-5], приобретаются навыки практических расчетов, проводится лабораторный практикум и выполняется курсовой проект.

Данное учебно-методическое пособие является частью учебно-методического комплекса и предназначено для подготовки и проведения практических занятий. В пособии содержится необходимый теоретический материал, методические рекомендации и примеры решения типовых задач, а также задачи для самостоятельного решения.

Пособие состоит из четырех разделов. Первый раздел посвящен описанию аналого-цифровых преобразований сигнала и расчету его параметров для заданной помехозащищённости. Во втором разделе рассматриваются вопросы преобразование сигнала в нелинейных кодерах. В третьем разделе представлены материалы по расчету помехоустойчивости цифрового линейного тракта, построенного на основе аппаратуры одноволновой цифровой волоконно-оптической системе передачи. В четвертом разделе рассмотрены вопросы расчета помехоустойчивости аналоговых волоконно-оптических систем передачи.

Список литературы включает источники [1-7], рекомендуемые для самостоятельного и более углубленного изучения вопросов, выносимых на практические занятия, а также нормативные документы [8-15].

Учебно-методическое пособие может быть рекомендовано для заочной формы обучения, при которой основной формой изучения дисциплины является самостоятельная работа студента над рекомендованной литературой, а также над материалом настоящего пособия. При этом в качестве заданий на контрольные работы могут быть рекомендованы приведенные в пособии задачи.

# 1 АНАЛОГО – ЦИФРОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛА. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА ПРИ ЗАДАННОЙ ПОМЕХОЗАЩИЩЁННОСТИ

Рассмотрим основные понятия, разбирая типичные задачи по данному разделу.

## 1.1 Основные расчетные формулы и примеры решения задач

### Задача № 1.1

На основе теоремы Котельникова определить частоту дискретизации  $F_\Delta$  первичного аналогового сигнала, спектр которого ограничен частотами  $F_H$  - 0,3 кГц и  $F_\epsilon$  - 3,4 кГц. Выбрать частоту дискретизации равной  $2F_\epsilon$ . Для рассчитанной на основе теоремы Котельникова и выбранной частоты дискретизации построить спектры амплитудно-импульсно модулированных (АИМ) – сигналов, полагая, что первичный сигнал не имеет постоянной составляющей.

### Решение

Определим частоту дискретизации  $F_\Delta$ :

а) по теореме Котельникова  $F_\Delta = 2F_\epsilon = 6,8$  кГц;

б) выбираем  $F_\Delta$  из условия  $F_\Delta \geq 2F_\epsilon = 8$  кГц.

Построим спектры АИМ – сигналов для рассчитанных частот, полагая, что первичный сигнал не имеет постоянной составляющей:

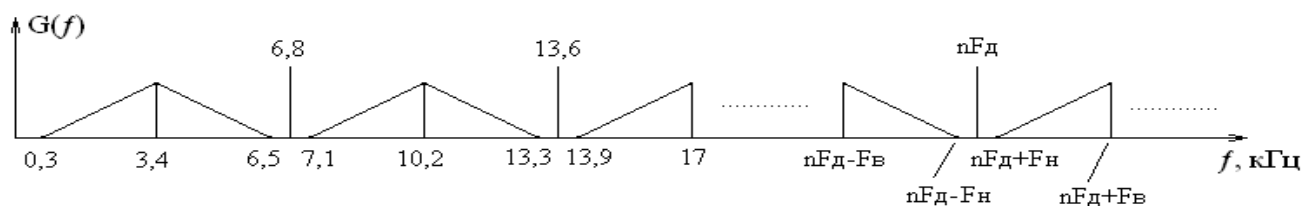


Рис.1.1 - Спектр АИМ – сигнала при  $F_\Delta = 6,8$  кГц

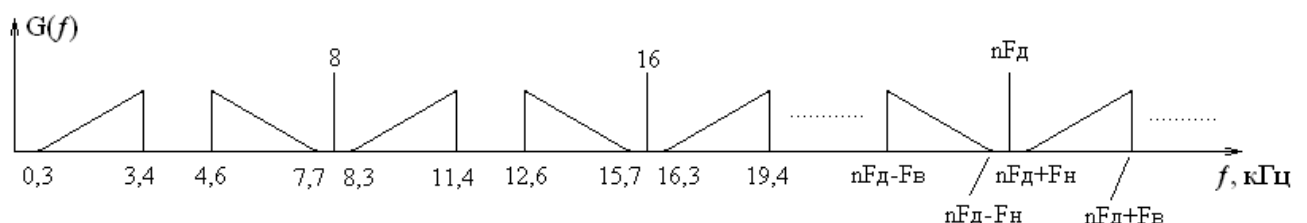


Рис.1.2 Спектр АИМ – сигнала при  $F_\Delta = 8$  кГц

Из рис.1.1 видно, что полоса расфилтровки  $\Delta F_p = (F_\delta - F_\epsilon) - F_\epsilon = 0$  и, следовательно, потребуется идеальный фильтр нижних частот (ФНЧ) с бесконечно большой крутизной для восстановления исходного непрерывного сигнала на приёме.

При  $F_\delta = 8$  кГц (рис. 1.2) полоса расфилтровки  $\Delta F_p = 1,2$  кГц оказывается достаточно большой, что делает возможным восстановление исходного непрерывного сигнала на приёме ФНЧ с частотой среза, равной 3,4 кГц .

### Задача № 1.2

Для двух отсчётов первичного аналогового сигнала с амплитудами 0,4 В и -2,8 В при заданном напряжении ограничения  $U_{огр} - 3,2$  В выполнить операции равномерного квантования и кодирования в симметричном и натуральном 5 – разрядном коде. Определить величины ошибок квантования этих отсчётов и изобразить полученные в результате кодирования кодовые слова (комбинации) в виде последовательности токовых и бестоковых посылок, считая, что двоичной единице соответствует токовая посылка, а нулю – бестоковая посылка.

### Решение

Выполним операцию равномерного квантования для двух отсчётов первичного аналогового сигнала с амплитудами 0,4 В и -2,8 В:

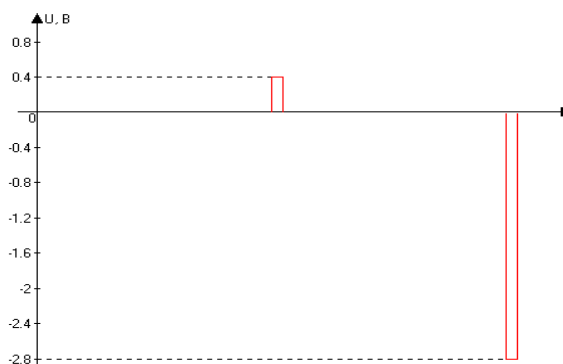


Рис.1.3 - Амплитуды отсчётов двух аналоговых сигналов

а) Для симметричного двоичного 5 – ти разрядного кода:

Число шагов квантования  $N_{кв} = 2^m = 2^4 = 32$ .

Абсолютное значение шага квантования  $\delta = 2U_{огр} / N_{кв} = 6,4 / 32 = 0,2$  В.

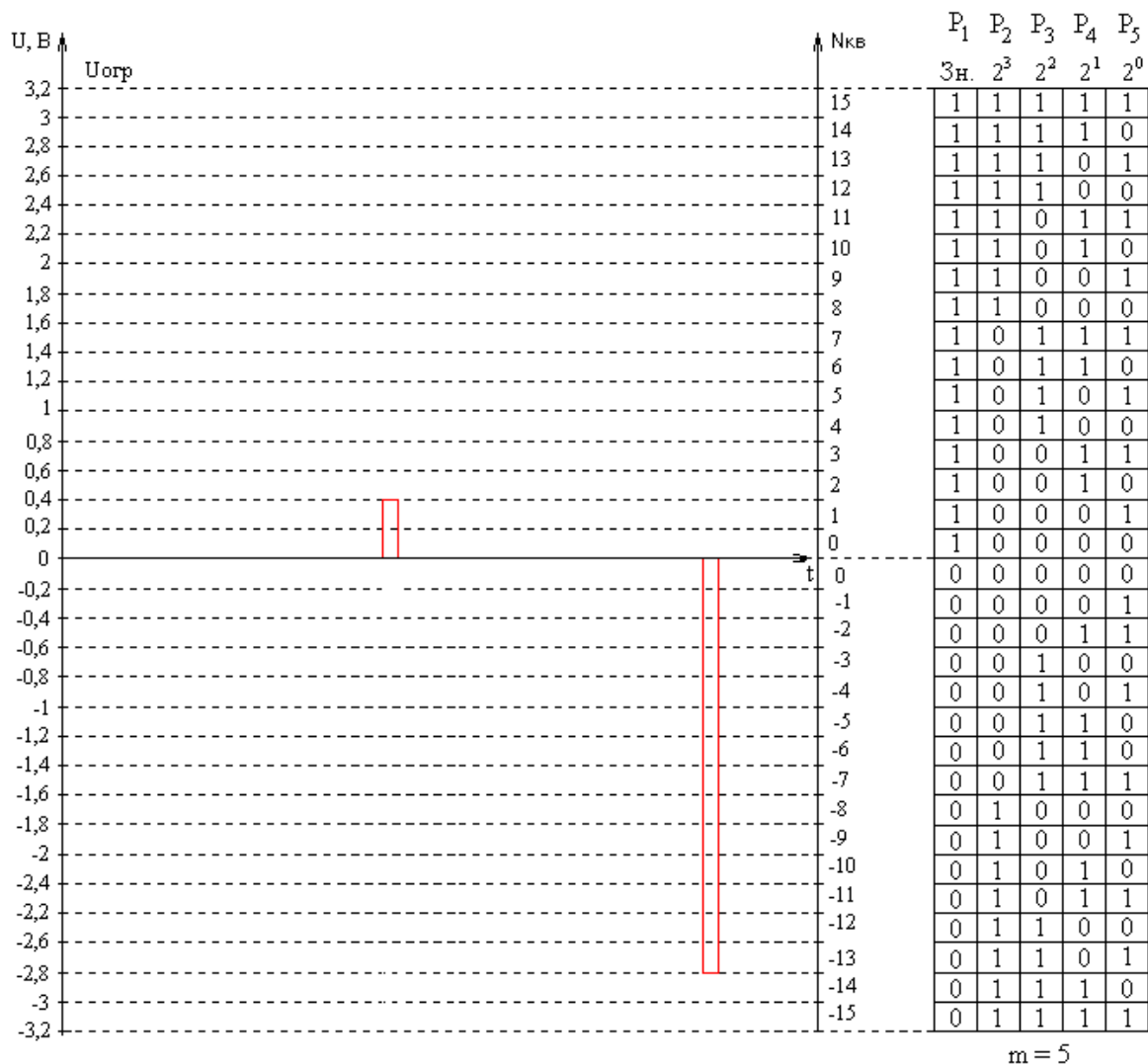


Рис.1.4 - Отсчёты, квантованные по уровню для симметричного двоичного кода

Таким образом отсчёту  $U_1=0,4$  В соответствует амплитуда, выраженная в шагах квантования  $H_1 = \frac{U_1}{\delta} = \frac{0,4}{0,2} = 2$ , отсчёту  $U_2=-2,8$  В амплитуда  $H_2 = \frac{U_2}{\delta} = \frac{-2,8}{0,2} = -14$ .

Ошибкой квантования называется разность между истинным значением отсчёта и его квантованным значением. Из рис.1.4 видно, что ошибка квантования для обоих отсчётов равна 0.

Выполним операцию кодирования полученных отсчётов Для этой цели чаще всего используют кодер взвешивающего типа. Кодирование методов взвешивания заключается в сравнении кодируемого мгновенного значения со значениями, создаваемыми источником эталонных токов (ИЭТ). Набор ИЭТ для 5 разрядного кодера содержит эталоны:  $\delta, 2\delta, 4\delta, 8\delta$ .

Закодируем первый отсчёт  $U_1 = 2\delta$ :





Данный код используется при кодировании однополярных сигналов. Можно кодировать и биполярные сигналы, обеспечив предварительно их смещение.

Так как исходные отсчёты имеют разную полярность, то предварительно выполним переход к отсчётам одной полярности (рис.1.4), добавив напряжение смещения  $U_{см} = U_{одр}/2 = 1,6$  В, при этом амплитуды отсчётов будут равны:

$$U_1 = 1,6 + 0,4 = 2 \text{ В.}$$

$$U_2 = 1,6 + (-2,8) = -1,2 \text{ В} \rightarrow U_2 = 0.$$

Число шагов квантования  $N_{кв} = 2^m = 2^5 = 32$  (0..31).

Абсолютное значение шага квантования  $\delta = U_{одр}/N_{кв} = 3,2/32 = 0,1$  В.

Таким образом отсчёту  $U_1 = 0,4$  В соответствует амплитуда, выраженная в шагах квантования  $H_1 = \frac{U_1}{\delta} = \frac{2}{0,1} = 20$ , отсчёту  $U_2 = 0$  В амплитуда  $H_2 = 0$ .

Из рис.1.6 видно, что ошибка квантования обоих отсчётов равна 0.

Выполним операцию равномерного кодирования методом взвешивания.

Закодируем первый отсчёт  $U_1 = 20\delta$ :

1) В 1 такте отсчёт сравнивается с наибольшим эталоном –  $16\delta$ :

$$20\delta > 16\delta \rightarrow 1.$$

2) Во 2 такте отсчёт сравнивается с суммой эталонов –  $16\delta + 8\delta = 24\delta$ :

$$20\delta < 24\delta \rightarrow 0.$$

3) В 3 такте отсчёт сравнивается с суммой эталонов –  $16\delta + 4\delta = 20\delta$ :

$$20\delta = 20\delta \rightarrow 1.$$

4) В 4 такте отсчёт сравнивается с суммой эталонов –  $16\delta + 4\delta + 2\delta = 22\delta$ :

$$20\delta < 22\delta \rightarrow 0.$$

5) В 5 такте отсчёт сравнивается с суммой эталонов –  $16\delta + 4\delta + 2\delta + \delta = 23\delta$ :

$$20\delta < 23\delta \rightarrow 0.$$

Таким образом, получена кодовая комбинация 10100.

Так как  $U_2 = 0$ , то очевидно, что при кодировании кодовая комбинация будет иметь вид 00000.

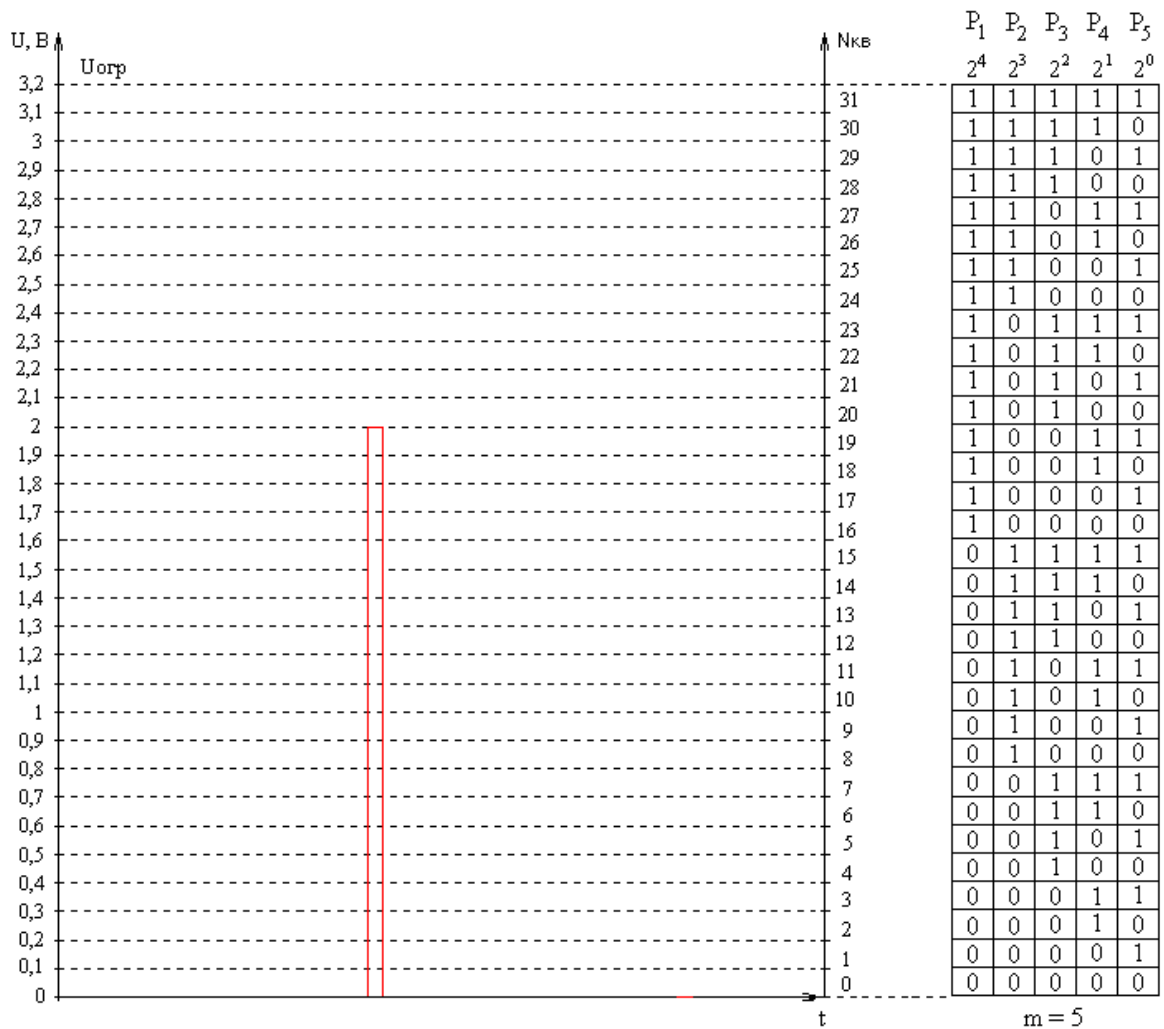


Рис.1.6 -Отсчёты, квантованные по уровню для натурального двоичного кода

Изобразим полученные в результате кодирования кодовые слова (рис. 1.7):

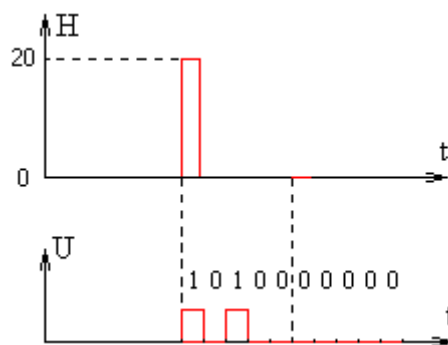


Рис.1.7 -Кодовые комбинации, полученные в результате кодирования.

### Задача № 1.3

Определить минимальное количество разрядов  $m$  в кодовом слове, при котором обеспечивается заданная помехозащищённость гармонического сигнала

(с минимальной амплитудой  $U_{мин} = 8$  мВ) от шумов квантования  $A_{пз.кв.} = 27$  дБ при равномерном квантовании. Построить зависимость помехозащищённости  $A_{пз.кв.}$  от уровня гармонического сигнала при изменении его амплитуды от  $U_{мин}$  до напряжения ограничения  $U_{огр} = 3$  В.

### Решение

Рассчитаем минимальное количество разрядов  $m$  в кодовом слове при  $A_{з.кв.} = 27$  дБ для гармонического сигнала. Для этого, рассмотрим выражение для помехозащищённости:

$$A_{з.кв.} = 10 \lg(P_c / P_{ш.кв.}),$$

где  $P_c = \left(\frac{U_m}{\sqrt{2}}\right)^2$  – средняя мощность гармонического сигнала на единичном сопротивлении, Вт;

$$P_{ш.кв.} = \frac{U_{огр}^2}{3 \cdot 2^{2m}} \text{ – средняя мощность шумов квантования, Вт.}$$

Подставляя записанные выражения для мощностей, получим:

$$A_{з.кв.} = 20 \lg \frac{U_m \cdot 2^m \cdot \sqrt{3}}{U_{огр} \cdot \sqrt{2}} = 20 \lg \frac{U_m}{U_{огр}} + 20 \lg \sqrt{\frac{3}{2}} + 20 \lg 2^m = 20 \lg \frac{U_m}{U_{огр}} + 1,76 + 6m .$$

Выражая  $m$  получим:

$$m = \frac{A_{з.кв.} - 1,76 + 20 \lg \left(\frac{U_{огр}}{U_m}\right)}{6} .$$

Подставляя исходные данные, получим:

$$m = \frac{27 - 1,76 + 20 \lg \left(\frac{3}{0,008}\right)}{6} = 12,78 .$$

Таким образом, при  $m = 13$  обеспечивается заданная помехозащищённость.

Построим зависимость помехозащищённости  $A_{з.кв.}$  от уровня гармонического сигнала при изменении его амплитуды от 8 мВ до напряжения ограничения 3 В ( $0,008 \text{ В} \leq U_c \leq 3 \text{ В}$ ):

$$A_{з.кв.} = P_c - P_{ш.кв.}$$

где уровень гармонического сигнала определяется из выражения:

$$p_c = 101g \frac{P_c}{P_0} = 101g \left( \frac{P_c}{P_0} \cdot \frac{R_x}{R_0} \right) = 201g \frac{U_{эфф}}{U_0} = 201g \frac{U_c}{\sqrt{2} \cdot 0,775};$$

а уровень шумов квантования:

$$p_{ш.кв.} = 101g \frac{P_{ш.кв.}}{P_0} = 101g \left( \frac{P_{ш.кв.}}{P_0} \cdot \frac{R_x}{R_0} \right) = 101g \frac{U_{опр}^2 \cdot R_x}{3N_{кв}^2 \cdot U_0^2} = 201g \left( \frac{U_{опр}}{2^m \cdot \sqrt{3} \cdot 0,775} \right).$$

Окончательно получим:

$$A_{з.кв.} = 201g \frac{U_c}{\sqrt{2} \cdot 0,775} - 201g \left( \frac{U_{опр}}{2^m \cdot \sqrt{3} \cdot 0,775} \right).$$

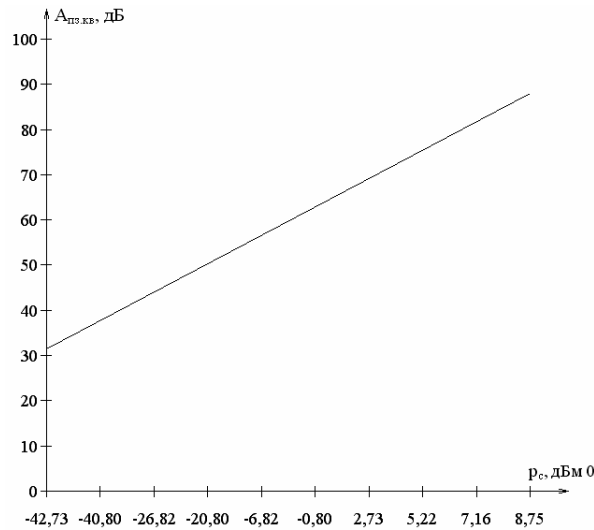


Рис. 1.8 - Зависимость  $A_{з.кв.} = f(p_c)$  при равномерном квантовании

### Задача № 1.4

Определить допустимый диапазон изменения уровня гармонического сигнала, в котором защищённость от шумов квантования остаётся не ниже заданной, при использовании неравномерного квантования с сегментированной характеристикой компрессии А – типа, рекомендуемой МККТТ.

### Решение

По зависимости  $A_{нз.кв.} = f(p_c)$  (рис.1.9) видно, что допустимый диапазон изменения уровня гармонического сигнала, в котором защищённость от шумов квантования остаётся не ниже 27 дБ, при использовании неравномерного квантования с сегментированной характеристикой компрессии А 87,6/13 составляет 3дБ – (–43,86дБ) = 46,86 дБ  $\approx$  47 дБ.

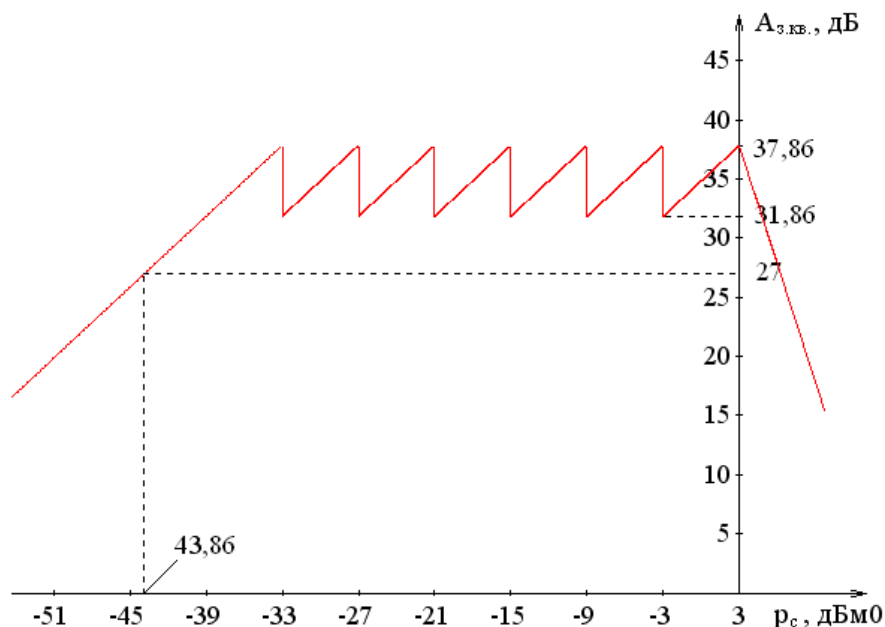


Рис. 1.9 - Зависимость  $A_{нз.кв.} = f(p_c)$  при неравномерном квантовании для гармонического сигнала

Пилообразный вид зависимости объясняется следующим образом: начало графика – наклонная прямая соответствует 0 и 1 сегменту характеристики компрессии  $A$  87,6/13. Это зона равномерного квантования, поэтому помехозащищённость возрастает пропорционально возрастанию уровня сигнала. При переходе ко 2 сегменту помехозащищённость скачком уменьшается на 6 дБ, поскольку во 2 сегменте величина шага квантования в 2 раза больше. Такая же картина повторяется при переходе к каждому последующему сегменту. Это зона неравномерного квантования. При достижении верхней границы – 7 сегмента ( $U_{огр}$ ) наступает зона перегрузки, где защищённость сигнала резко падает, но уже за счёт шумов ограничения сигнала.

### Задача № 1.5

Обосновать, почему в ЦСП с ИКМ, предназначенных для передачи телефонных сигналов, следует применять неравномерное квантование с характеристикой компрессии, близкой к логарифмической.

### Решение

В ЦСП с ИКМ, предназначенных для передачи телефонных сигналов, следует применять неравномерное квантование, т.к. при этом для слабых сигналов мощность шумов квантования  $P_{ш.кв.}$  уменьшается, а для сильных

возрастает, что приводит к увеличению помехозащищённости  $A_{нз.кв.}$  для слабых сигналов и снижению  $A_{нз.кв.}$  – для сильных, которые имели большой запас по помехозащищённости. В результате удаётся снизить разрядность кода (до 8), обеспечив при этом выполнение требований к помехозащищённости от шумов квантования в широком динамическом диапазоне сигнала, составляющем около 40 дБ. Т. о. происходит выравнивание  $A_{нз.кв.}$  в широком диапазоне изменения уровней сигнала. Эффект неравномерного квантования пропорционален сжатию динамического диапазона сигнала, которое осуществляется с помощью компрессора, обладающего нелинейной амплитудной характеристикой близкой к логарифмической. В современных ЦСП находят применение 2 квазилогарифмические характеристики компандирования (типа А и  $\mu$ ).

## 1.2 Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитать и сравнить мощность шумов квантования при равномерном квантовании для заданных значений разрядности кода  $m$  и напряжения ограничения  $u_{огр}$  (при использовании натурального симметричного кода).

2. Рассчитать и сравнить величины шагов квантования для кодеров указанного типа при заданном напряжении ограничения  $u_{огр}$ .

3. На выходе линейного кодера в процессе кодирования отсчетов натуральным симметричным кодом некоторого канального сигнала были последовательно сформированы заданные кодовые комбинации. Определить сигнал на входе кодера и на выходе декодера, если в процессе передачи произошли ошибки в символах, помеченных в задании.

4. Задан отсчет сигнала и напряжение ограничения кодера. Записать кодовые комбинации, соответствующие данному отсчету, при использовании натурального симметричного и несимметричного кода.

5. Задана кодовая комбинация на выходе кодера аппаратуры ИКМ-30. Рассчитать амплитуду отсчета на входе кодера, а также номера сегмента и шага внутри сегмента характеристики компандирования, соответствующие данному отсчету, полагая, что напряжение ограничения кодера равно  $u_{огр}$ .

## 2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛА В НЕЛИНЕЙНОМ КОДЕРЕ С ХАРАКТЕРИСТИКОЙ А-ТИПА

### 2.1 Основные теоретические сведения

Численной характеристикой влияния шумов квантования на точность кодирования аналогового сигнала может служить отношение мощностей сигнала и шума квантования. Для двуполярного сигнала это отношение равно:

$$\frac{P_c}{P_{ш.к.}} = 10.8 + 20 \lg\left(\frac{U}{U_{огр}}\right) + 6n - 6, \text{ (дБ)}.$$

Для однополярного сигнала:

$$\frac{P_c}{P_{ш.к.}} = 10.8 + 20 \lg\left(\frac{U}{U_{огр}}\right) + 6n, \text{ (дБ)}.$$

Изменение мощности передаваемого сигнала приводит к снижению величины сигнал-шум. На рис. 2.1 приведена зависимость отношения сигнал-шум (с учетом искажений, как квантования, так и ограничения).

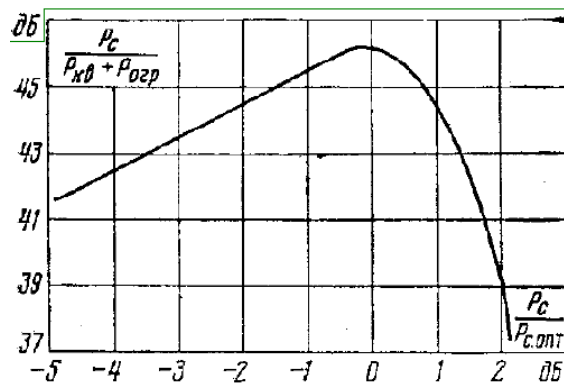


Рис. 2.1 - Зависимость отношения сигнал-шум от уровня сигнала

от уровня сигнала с нормальным законом распределения мгновенных значений. Резкое падение величины отношения сигнал-шум при превышении сигналом оптимального уровня вызвано ростом мощности искажений ограничения.

Уменьшение сигнала вызывает пропорциональное снижение отношения сигнал-шум, т. е. передача слабых сигналов сопровождается



большими искажениями.

Если изменять шаг квантования пропорционально значению квантуемого сигнала, то отношение сигнал-шум при изменении сигнала будет сохраняться постоянным. Переменную величину шага можно получить, например, с помощью устройства с нелинейной амплитудной характеристикой и равномерного квантователя (рис.2.2). Исходный сигнал передается через устройство, коэффициент передачи которого обратно пропорционален величине сигнала, квантуется и проходит через схему, нелинейность которой обратная нелинейности входного устройства. Таким образом, перед квантованием осуществляется компрессия (сжатие) динамического диапазона входного сигнала, а после квантования - его расширение, что обеспечивает общую линейность системы передачи.

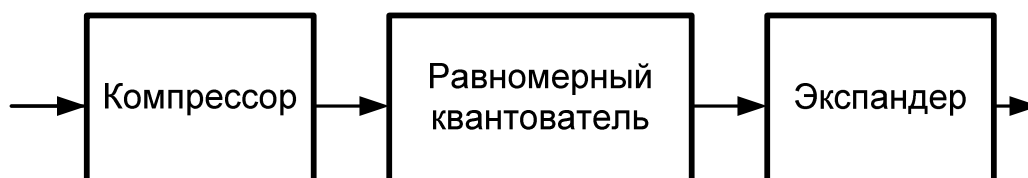


Рис. 2.2 - Структурная схема устройства неравномерного квантования с компандированием аналогового сигнала

Совокупность операций сжатия диапазона, осуществляемого компрессором, и расширения, производимого экспандером, называется **компандированием** сигнала.

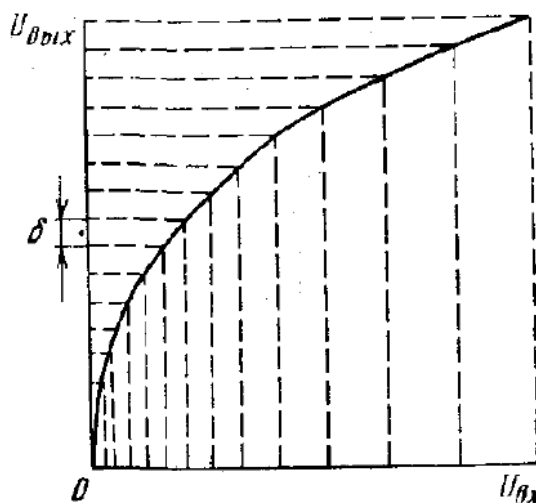


Рис.2.3 - Характеристика компрессии

Амплитудная характеристика входного устройства  $U_{вых}=y(U_{вх})$  (рис. 2.3) называется характеристикой компрессии. Характеристика компрессии связывает шкалу равномерного квантования (ось ординат) со шкалой неравномерного квантования и характеризует любую систему неравномерного квантования даже при отсутствии компрессора как отдельного узла. Шаг неравномерного квантования определяется из выражения

$$\delta(U_{вх}) = \frac{\delta_p}{y'(U_{вх})},$$

где  $\delta_p = \frac{U_{оп}}{2^{n-1}}$  величина шага при равномерном квантовании. Постоянство отношения сигнал-шум квантования соответствует условию

$$U_{вх} y'(U_{вх}) = U_{вх} \frac{dy}{dU_{вх}} = const.$$

После разделения переменных и интегрирования получим

$$y \approx c_1 \ln U_{вх} + c_2 = c_1 \ln \mu U_{вх}, \quad (2.1)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  - постоянные интегрирования;  $\mu = e^{\frac{c_1}{c_2}}$ . Функция  $y(U_{вх})$  должна удовлетворять условиям:

$$y(0) = 0; \quad y(1) = 1. \quad (2.2)$$

Условия (2.2) не выполняются при конечных значениях  $c_1$  и  $c_2$ . Если видоизменить выражение (2.1) и принять

$$y = c \cdot \ln(\mu U_{вх} + b), \quad (2.3)$$

то условия (2.2) выполняются при

$$b = 1 \quad \text{и} \quad c = \frac{1}{\ln(1 + \mu)}.$$

Подставляя  $b$  и  $c$  в выражение (2.3), получаем искомую зависимость

$$y = \frac{\ln(1 + \mu |U_{вх}|)}{\ln(1 + \mu)},$$

которая широко используется в АЦП ИКМ.

Зависимости величины  $\frac{U_{\text{ex}}}{\delta(U_{\text{ex}})}$  от входного сигнала для различных  $\mu$  приведены на рис.2.4. При увеличении  $\mu$  расширяется область значений входного сигнала, в которой отношение сигнал-шум квантования приблизительно постоянно при  $\mu \cdot U_{\text{ex}} \gg 1$ .

В современных ЦСП находят применение две логарифмические характеристики компандирования (типов А и  $\mu$ ), которые удобно изображать и описывать в нормированном виде  $y=f(x)$ , где  $y = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ОГР}}$ ,  $x = U_{\text{ВХ}}/U_{\text{ОГР}}$ :

$$y = \begin{cases} \frac{A|x|}{1 + \ln A}; & 0 \leq |x| \leq \frac{1}{A} \\ \frac{1 + \ln(A|x|)}{1 + \ln A}; & \frac{1}{A} \leq |x| \leq 1 \end{cases},$$

$$y = \frac{\ln(1 + \mu|x|)}{\ln(1 + \mu)}; \quad 0 \leq |x| \leq 1,$$

где  $A=87,6$  и  $\mu=255$  - параметры компрессии.

Характеристика компандирования типа А используется в ЦСП, соответствующих европейской ПЦИ, а типа  $\mu$  - в ЦСП, соответствующих североамериканской ПЦИ.

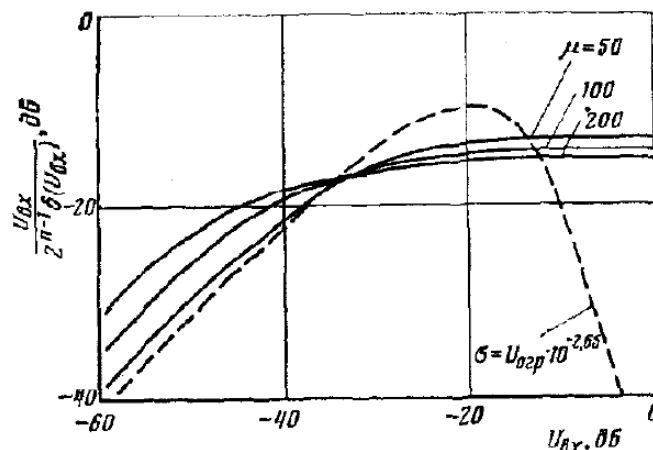


Рис. 2.4. - Зависимость  $\frac{U_{\text{ex}}}{\delta(U_{\text{ex}})}$  от величины входного сигнала.

Оценим выигрыш от компандирования с А законом.

Если  $\delta$  - выигрыш, то

$$\delta = \frac{\frac{\Delta U_c}{U_c}}{\frac{\Delta U_{ex}}{\Delta U}} = \frac{\Delta U}{\Delta U_{ex}} \Big|_{U_c \rightarrow 0} = y'(0),$$

$$y'(0) = \frac{1}{\ln(1+\mu)} \cdot \frac{1}{1+\mu \cdot |U|} \Big|_{u=0} \cdot \mu = \frac{\mu}{\ln(1+\mu)}.$$

При  $A=87.6$  получим

$$\delta(A) = y'(0) = 20 \lg\left(\frac{A}{1 + \ln A}\right) = 24.08(\text{дБ}).$$

Кодеком называют систему КОдер-ДЕКОдер, определяющую в ЦСП соотношение между качеством передачи сигнала и скоростью цифрового потока. Импульсно-кодovou модуляцию называют ИКМ-64, ибо цифровой поток на один канал имеет скорость  $f_{\text{д}} \cdot m = 8(\text{кГц}) \cdot 8(\text{разрядов}) = 64 \text{ кбит/с}$ . Из трёх регламентированных Рек. G.711 и G.712 МСЭ-Э версий ИКМ-64 далее речь пойдёт только о европейской.

Согласование динамических диапазонов канала и сигнала производят с помощью компрессии сигнала. Поскольку кодер является групповым устройством, компрессия должна быть безинерционной (мгновенной). Мгновенный компрессор представляет собой усилитель с нелинейной амплитудной характеристикой  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ , называемым по входящему в него параметру компрессии  $A$   $A$ -законом. При  $A=1$  имеем линейную амплитудную характеристику; чем больше значение параметра  $A>1$ , тем выше степень компрессии.

От аналоговых компандеров (КОМпрессоров + эксПАНДЕРОВ) перешли к цифровой обработке сигнала, приняв сегментированный  $A$ -закон. Шкала непрерывного  $U_{\text{вх}}$  и квантованного  $U_{\text{вых}}$  напряжений представлена на рис.2.5. Знак кодируется отдельно от модуля отсчёта (симметричный код), поэтому показана только положительная полуось.

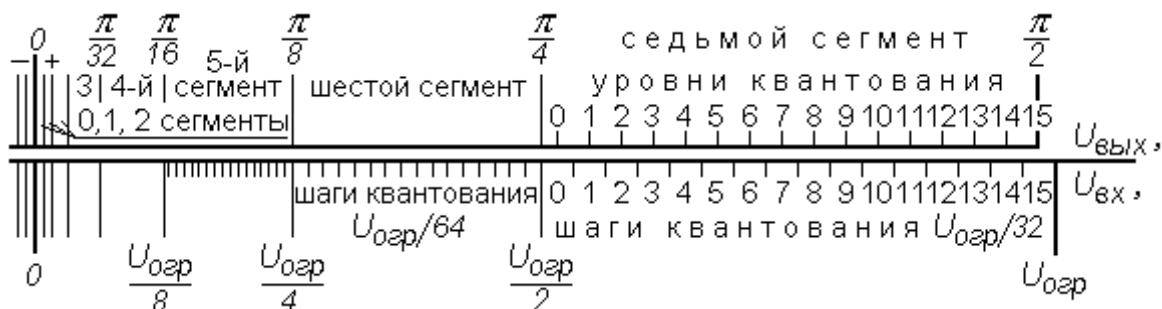


Рис. 2.5

Значение напряжения ограничения  $U_{огр}$  получают, исходя из следующего. Регламентирован уровень ограничения  $p_{огр}$  гармонического испытательного колебания равный +3,14 дБ. Очевидно, напряжение ограничения равно амплитуде этого гармонического колебания, то есть превышает его эффективное напряжение  $U_{эфф}$  в  $\sqrt{2}$  раз:

Диапазон изменения  $U_{вых}$  от  $U_{огр}$  до нуля разбит на 8 сегментов, получаемых последовательным семикратным делением левой части отрезка пополам. Каждый сегмент равномерно разделён на 16 шагов квантования. Для определения номера шага квантования, соответствующего  $U_{вх}$ , необходимы  $1(\text{знак})+3(\text{номер сегмента})+4(\text{номер шага квантования})=8$  разрядов; общее число шагов квантования составляет  $2^8 = 256$ . Отметим, что шаги квантования четырёх центральных сегментов одинаковы, поэтому А-закон называют тринадцатисегментным ( $2 \cdot 8 - 4 + 1 = 13$ ).

Величина шага квантования на 7-м сегменте равна  $U_{огр} / 2 / 16 = U_{огр} / 32$ .

На каждом следующем сегменте, кроме нулевого, она уменьшается вдвое, составляя в центральном сегменте  $U_{огр} 2^{-11} = \delta_0$ .

Значения напряжений в  $\delta_0$ , соответствующих нижней  $U_{ни}$ , верхней  $U_{ви}$  границам и шагов квантования  $\Delta_i$   $i$ -го сегмента, а также мощности искажений квантования  $P_{кв\ i}$  в нВт, равной  $\Delta_i^2 / 12$ , приведены в табл. 2.1. Для удобства расчётов учтено, что  $U_{огр}$  практически точно равно  $\pi/2$ .

Отметим, что если бы квантование было равномерным, то шаг квантования составлял  $2^{-(8-1)} = 2^{-7} = 1/128$  долю  $U_{огр}$ , то есть был в  $2^{-7} / 2^{-11} = 16$  раз больше, чем  $\Delta_0$ . Это означает, что дифференциальное усиление  $K$  эквивалентным аналоговым компрессором бесконечно малого сигнала

равнялось бы 16.

Таблица 2.1 - Параметры сегментов по А-закону компандирования

Параметр,	Номер сегмента $i$							
	0	1	2	3	4	5	6	7
$U_{ni}, \delta_0$	0	$\pi/256$	$\pi/128$	$\pi/64$	$\pi/32$	$\pi/16$	$\pi/8$	$\pi/4$
$U_{vi}, \delta_0$	$\pi/256$	$\pi/128$	$\pi/64$	$\pi/32$	$\pi/16$	$\pi/8$	$\pi/4$	$\pi/2$
$\Delta_i, \delta_0$	$\pi/4096$		$\pi/2048$	$\pi/1024$	$\pi/512$	$\pi/256$	$\pi/128$	$\pi/64$
$P_{кв}, \text{нВт}$	0,082		0,328	1,311	5,246	20,98	83,93	335,7

Рассмотрим пример прохождения через кодек с законом компандирования  $A=87,6/13$  отсчёта с абсолютным значением напряжения  $U_{вх0}$ , равным  $67,3 \delta_0$ .

На передаче отсчёт окажется в пределах 3-го сегмента с  $U_{ni} = 49,1\delta_0$  и  $U_{vi} = 98,2\delta_0$ . Номер уровня квантования равен разности напряжения отсчёта и напряжения нижней границы сегмента  $U_{вх0} - U_{н3} = 67,3 - 49,1 = 18,2\delta_0$ , деленной на величину шага квантования на 3-м сегменте  $E[18,2/3,07] = [5,9] = 5$ , где  $E[x]$  – функция Entier отбрасывания дробной части числа. Таким образом, будет передана кодовая комбинация вида  $\pm 011 0101$ , содержащая знак числа ( $\pm$ ) и десятичные числа 3 и 5 в двоичном представлении.

На приёме будет вычислен уровень квантования, как сумма напряжений нижней границы сегмента, сложенная с произведением напряжения шага квантования на номер уровня квантования в сегменте плюс половина:  $49,1 + 3,07 \cdot (5 + 0,5) = 66,0 \delta_0$ . Ошибка квантования в данном случае составила  $67,3 - 66,0 = 1,3 \delta_0$ , что составляет  $1,3/3,07 = 0,4$  от шага квантования. Заметим, что прибавление полушага квантования на приёме переводит операцию отбрасывания дробной части числа  $E[x]$  в операцию округления до ближайшего целого; при отбрасывании ошибка составила бы 0,9 шага квантования.

Основным показателем качества кодека ЦСП является зависимость  $A_{кв}(p_{вх})$  защищённости сигнала ( $p_{вх}$ , дБм), от искажений квантования на выходе декодера  $A_{кв}$ , дБ, регламентированная Рек. G.712 для испытательных сигналов – гармонического колебания.

При уменьшении  $p_{вх}$  сначала защищённость снижается из-за уменьшения  $P_c$ , затем повышается, поскольку всё больше отсчётов попадает на сегмент с меньшими шагами квантования. На первом и нулевом сегментах имеют место равномерное квантование и линейный ход характеристики. При кодировании по  $A$ -закону аналоговых сигналов задают требуемое значение защищённости  $A_{кв.треб}$  в динамическом диапазоне  $D$ . Необходимо найти число разрядов для номера уровня квантования  $m_{ур.кв}$  и номера сегмента  $m_{сег}$ .

Из рис. 2.6 следует, что защищённость от искажений квантования  $A_{кв.0,1} = A_{кв.треб} + 2$  дБ.

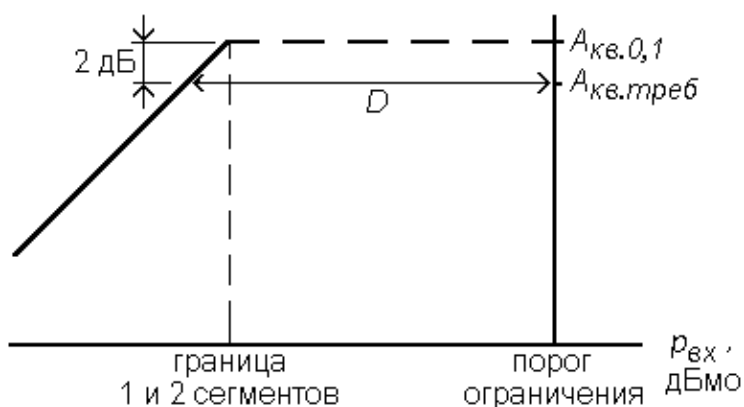


Рис. 2.6

При реализации любого кодера основным элементом является компаратор – быстродействующий операционный усилитель с дифференциальным каскадом на входе. В цепь обратной связи компаратора включён декодер. Функциональная схема кодера ИКМ-64 с  $A$ -законом компандирования приведена на рис. 2.7.

Для определения символа  $P_0$  знака отсчёта ключ Кл.0 замыкается, и на инверсный вход компаратора подаётся нулевой потенциал корпуса. В дифференциальном входном каскаде компаратора происходит вычитание из напряжения входного сигнала нуля. В последующих каскадах разность усиливается настолько, что выходной каскад оказывается либо в насыщении (если входной сигнал положителен  $P_0 = "1"$ ), либо в отсечке (если входной сигнал отрицателен  $P_0 = "0"$ ).

Отметим, что неопределённость в значении напряжения сигнала описанными действиями была уменьшена в два раза – уточнена полуось, на

которой находится входное напряжение. Последующие действия кодера также каждый раз уменьшают неопределённость вдвое.

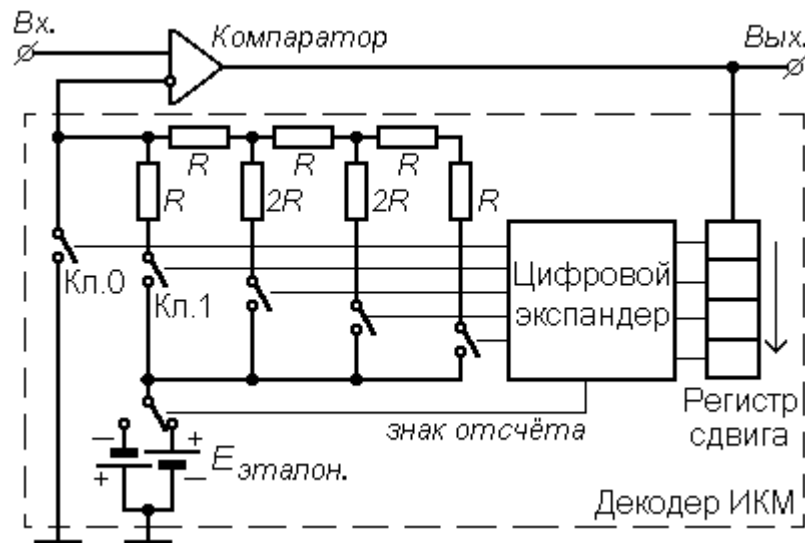


Рис.2.7

В ходе определения номера сегмента на инверсном входе сначала устанавливается напряжение границы между 3 и 4 сегментами, в результате определяется, в младших (0, 1, 2 или 3) или в старших (4, 5, 6 или 7) сегментах находится напряжение отсчёта. Полученные результаты хранятся в памяти (регистре сдвига) и используются при выборе пары сегментов, а затем – и конкретного сегмента. Номер сегмента определяется за три такта, формируются разряды кодовой комбинации P1, P2 и P3, рис. 2.8а.

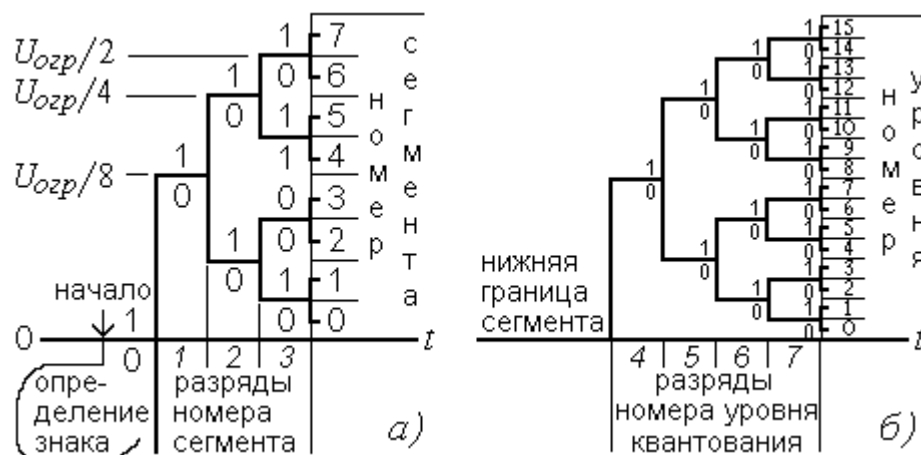


Рис. 2.8

Определение номера уровня квантования происходит аналогично путём



установки опорного напряжения нижней границы сегмента с найденным номером и коммутации ключами  $8 \Delta_i$ , затем 4 или  $12 \Delta_i$  и так далее. За 4 такта определяются символы разрядов P5..P8, рис. 2.8б.

Напряжения на инверсном входе компаратора устанавливаются под управлением цифрового экспандера с помощью матрицы ключей Кл.1 и др. Формирование эталонных напряжений  $U_{огр}/2$ ,  $U_{огр}/4$  и т.д. производится матрицей R-2R (в САЦК выполнена на коммутируемых конденсаторах).

В аппаратуре ИКМ-30 цифровой экспандер выполнен в виде конечного автомата на 8 входов и 12 выходов. Возможно исполнение всей цифровой логики кодека также на микросхемах памяти.

## 2.2 Примеры решения задач

### Задача № 2.1

Для двух отсчётов первичного аналогового сигнала с амплитудами 1,8 В и -3,2 В выполнить операции неравномерного квантования и кодирования, осуществляемые в нелинейном кодере с сегментированной характеристикой компрессии А – типа, если минимальный шаг квантования составляет 2 мВ. Определить величины ошибок квантования этих отсчётов и изобразить полученные в результате кодирования кодовые слова в виде последовательности токовых и бестоковых посылок.

### Решение

По минимальному шагу квантования рассчитаем напряжение ограничения:

$$U_{огр} = 2048\delta_0 = 4,096 \text{ В.}$$

Определим номер сегмента  $N_c$ , соответствующий амплитуде отсчёта 1,8В:

$$x = \frac{U_1}{U_{огр}} = \frac{1,8}{4,096} \approx 0,44.$$

На характеристике компандирования, рис.2.6, это соответствует 6 сегменту.

Определим номер сегмента  $N_c$ , соответствующий амплитуде отсчёта -3,2В:

$$x = \frac{U_2}{U_{огр}} = \frac{-3,2}{4,096} \approx -0,78.$$

Для определения номера сегмента воспользуемся положительной ветвью характеристики компандирования (рис.2.9).  $x = 0,78$  соответствует 7 сегменту.

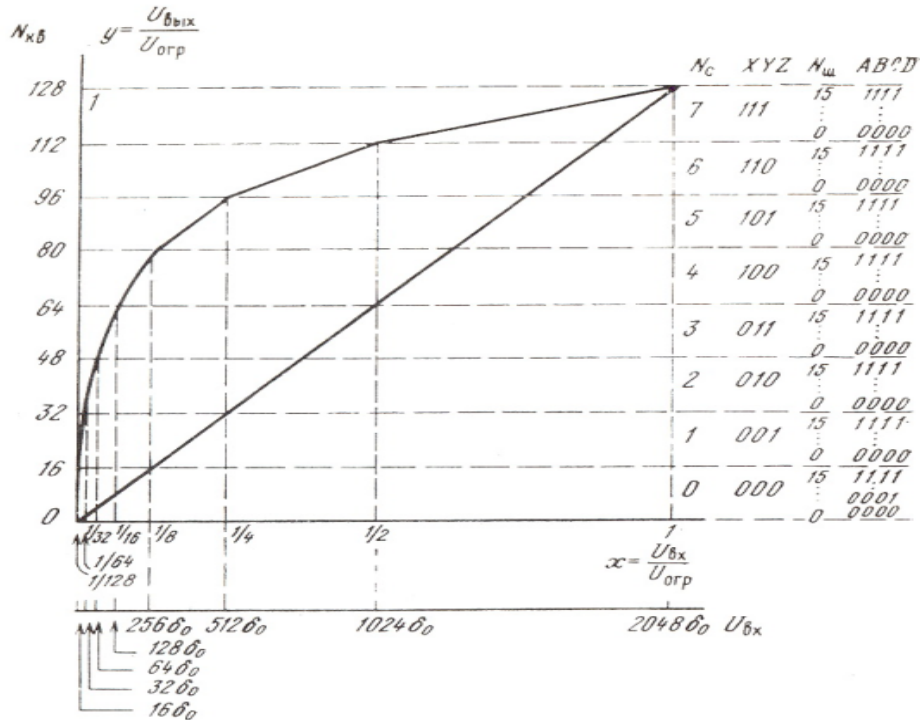


Рис.2.9 Характеристика компандирования типа  $A = 87,6/13$  (положительная ветвь)

Для кодирования сигнала воспользуемся принципом взвешенного кодирования

Структура кодовой комбинации на выходе кодера с характеристикой  $A = 87,6/13$  имеет вид PXYZABCD, где P – знаковый символ (1 – для положительных сигналов, 0 – для отрицательных); XYZ – символы кода номера сегмента  $N_{с}$ ; ABCD – символы кода номера шага внутри сегмента.

Выполним поэтапно операцию кодирования для первого отсчёта  $U_1 = 900\delta_0$ .

1) На первом этапе определяем знаковый символ – P: Так как отсчёт положительный, то  $P = 1$ .

2) На втором этапе в течении 2,3,4 тактов происходит формирование разрядов кода номера сегмента – XYZ. Для шестого сегмента  $XYZ = 110$ .

Алгоритм формирования кода 6 сегмента показан на рис.2.10:

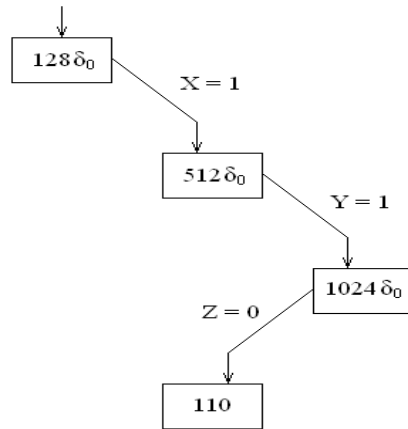


Рис.2.10 - Алгоритм формирования кода 6 сегмента

3) На третьем этапе в течении последующих 4 тактов формируются символы ABCD кодовой комбинации, значение которых зависит от номера шага квантования внутри сегмента. Т.к. внутри любого сегмента осуществляется равномерное квантование, то процесс кодирования осуществляется путём последовательного включения эталонных напряжений, соответствующих данному сегменту:

1) В 5 такте отсчёт сравнивается с суммой эталонов –  $512\delta_0 + 256\delta_0 = 768\delta_0$ :

$$900\delta_0 > 768\delta_0 \rightarrow A = 1.$$

2) В 6 такте отсчёт сравнивается с суммой эталонов –  $512\delta_0 + 256\delta_0 + 128\delta_0 = 896\delta_0$ :

$$900\delta_0 > 896\delta_0 \rightarrow B = 1.$$

3) В 7 такте отсчёт сравнивается с суммой эталонов –  $512\delta_0 + 256\delta_0 + 128\delta_0 + 64\delta_0 = 960\delta_0$ :

$$900\delta_0 < 960\delta_0 \rightarrow C = 0.$$

4) В 8 такте отсчёт сравнивается с суммой эталонов –  $512\delta_0 + 256\delta_0 + 128\delta_0 + 32\delta_0 = 928\delta_0$ :

$$900\delta_0 < 928\delta_0 \rightarrow D = 0$$

Т.о., на выходе кодера будет получена кодовая комбинации 11101100.

Выполним операцию кодирования для второго отсчёта  $U_2 = -1600\delta_0$

1) Определяем знаковый символ – P:

Так как отсчёт отрицательный, то  $P = 0$ .

2) Находим разряды кода номера сегмента – XYZ. Для 7 сегмента XYZ = 111. Алгоритм формирования кода 7 сегмента показан на рис.2.11:

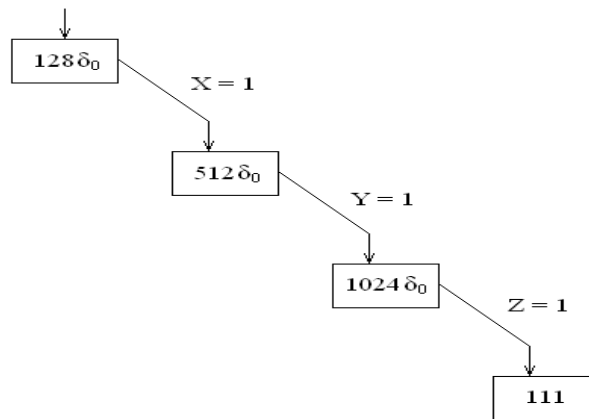


Рис.2.11 - Алгоритм формирования кода 7 сегмента

3) Находим символы ABCD кодовой комбинации:

1) Сравниваем отсчёт с суммой эталонов –  $1024\delta_0 + 512\delta_0 = 1536\delta_0$ :

$$1600\delta_0 > 1536\delta_0 \rightarrow A = 1.$$

2) Сравниваем отсчёт с суммой эталонов –  $1024\delta_0 + 512\delta_0 + 256\delta_0 =$

$1792\delta_0$ :

$$1600\delta_0 < 1792\delta_0 \rightarrow B = 0.$$

3) Сравниваем отсчёт с суммой эталонов –

$$1024\delta_0 + 256\delta_0 + 128\delta_0 = 1664\delta_0:$$

$$1600\delta_0 < 1664\delta_0 \rightarrow C = 0.$$

4) В 8 такте отсчёт сравнивается с суммой эталонов –

$$1024\delta_0 + 256\delta_0 + 64\delta_0 = 1600\delta_0:$$

$$1600\delta_0 = 1600\delta_0 \rightarrow C = 1.$$

Т.о., на выходе кодера будет получена кодовая комбинации 01111001.

Изобразим полученные кодовые слова (Рис. 2.12):

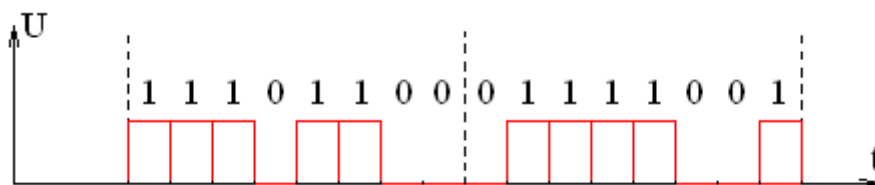


Рис.2.12 - Кодовые комбинации, полученные в результате кодирования.

Определим величину ошибки квантования для 1 отсчёта:

$$1,8В - 900\delta_0 = 1,8В - 900 \cdot 2мВ = 0.$$

Определим величину ошибки квантования для 2 отсчёта:

$$3,2B - 1600\delta_0 = 3,2B - 1600 \cdot 2\text{мВ} = 0.$$

### Задача № 2.2

Осуществить нелинейное декодирование кодовых слов, полученных в задаче № 2.1, если в указанных заданием разрядах произошли ошибки.

#### Решение

Обобщённый вид кодовой комбинации: PXYZABCD.

Полученные в п.1 кодовые слова имеют вид: 11101100 и 01111001.

По условию ошибки произошли в первом кодовом слове в разрядах A и D. Таким образом необходимо декодировать следующие кодовые комбинации: 11100101 и 01111001.

Выполним поэтапно операцию нелинейного декодирования для 1 отсчёта:

1) Определяем знак отсчёта по старшему разряду 11100101: P = 1, следовательно отсчёт положительный.

2) Определяем номер сегмента 11100101: XYZ = 110, что соответствует 6 сегменту.

3) Находим значение амплитуды отсчёта, с учётом того, что к декодированному сигналу добавляется напряжение, равное половине шага квантования в данном сегменте  $0,5\delta_i$ , с целью уменьшения величины ошибки квантования:

$$U = U_{эmi} + A \cdot 8\delta_i + B \cdot 4\delta_i + C \cdot 2\delta_i + D \cdot \delta_i + 0,5\delta_i,$$

где  $U_{эmi}$  – эталонное напряжение, соответствующее нижней границе  $i$  – го сегмента;  $\delta_i$  – шаг квантования в  $i$  – м сегменте.

$$U_1 = 512\delta_0 + 0 \cdot 8 \cdot 32\delta_0 + 1 \cdot 4 \cdot 32\delta_0 + 0 \cdot 2 \cdot 32\delta_0 + 1 \cdot 32\delta_0 + 16\delta_0 = 688\delta_0.$$

Т.к. по условию  $\delta_0 = 2\text{мВ}$ , то  $U_1 = 1,376 \text{ В}$

Аналогичным образом декодируем второй отсчёт 01111001:

1) P = 0, следовательно отсчёт имеет отрицательное значение.

2) XYZ = 111, следовательно 7 сегмент.

3) Значение амплитуды отсчёта :

$$U = -(U_{эmi} + A \cdot 8\delta_i + B \cdot 4\delta_i + C \cdot 2\delta_i + D \cdot \delta_i + 0,5\delta_i).$$

$$U_2 = -(1024\delta_0 + 1 \cdot 8 \cdot 64\delta_0 + 0 \cdot 4 \cdot 64\delta_0 + 0 \cdot 2 \cdot 64\delta_0 + 1 \cdot 64\delta_0 + 32\delta_0) = -1632\delta_0 = -3,264 \text{ В.}$$

По полученному значению амплитуды 2 отсчёта, в разрядах которого не произошло ошибок видно, что при нелинейном декодировании кодовых слов неизбежно возникает ошибка, величина которой не превышает половины шага квантования для данного сегмента.

Для отсчёта  $U_2 = -3,2 \text{ В}$   $U_{\text{ош}} \leq 32\delta_0$ . Проверяя справедливость данного утверждения, получим:

$$3,2 \text{ В} - 3,264 \text{ В} = -0,064 \text{ В} = -32\delta_0.$$

## 2.3 Задачи для самостоятельного решения

2.1 На вход нелинейного кодера с характеристикой компандирования типа А 87,6/13 поступает отсчет с напряжением  $u_{\text{вх}} = -1,1 \text{ В}$ . Определить напряжение ограничения кодера  $u_{\text{огр}}$ , если на его выходе при этом была сформирована комбинация 0110 0111.

2.2 На выходе линейного кодера в процессе кодирования отсчетов натуральным симметричным кодом некоторого канального сигнала были последовательно сформированы заданные кодовые комбинации. Определить сигнал на входе кодера и на выходе декодера, если в процессе передачи произошли ошибки в символах, помеченных в задании.

2.3 На вход нелинейного кодера с характеристикой компандирования типа А 87,6/13 поступает отсчет с напряжением  $u_{\text{вх}} = -1,3 \text{ В}$ , а напряжение ограничения кодера - 3,3 В. Записать кодовые комбинации, соответствующие данному отсчету, при использовании натурального симметричного и несимметричного кода.

2.4 Кодовая комбинация на выходе кодера аппаратуры ИКМ-30 - 0110 0111. Рассчитать амплитуду отсчета на входе кодера, а также номера сегмента и шага внутри сегмента характеристики компандирования типа А 87,6/13, соответствующие данному отсчету, полагая, что напряжение ограничения кодера равно 3,5 В.

# 3 ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ <sup>1</sup>

## 3.1 Основные теоретические сведения

- Блок схема линейного регенератора (РЛ) представлена на рис.3.1.:

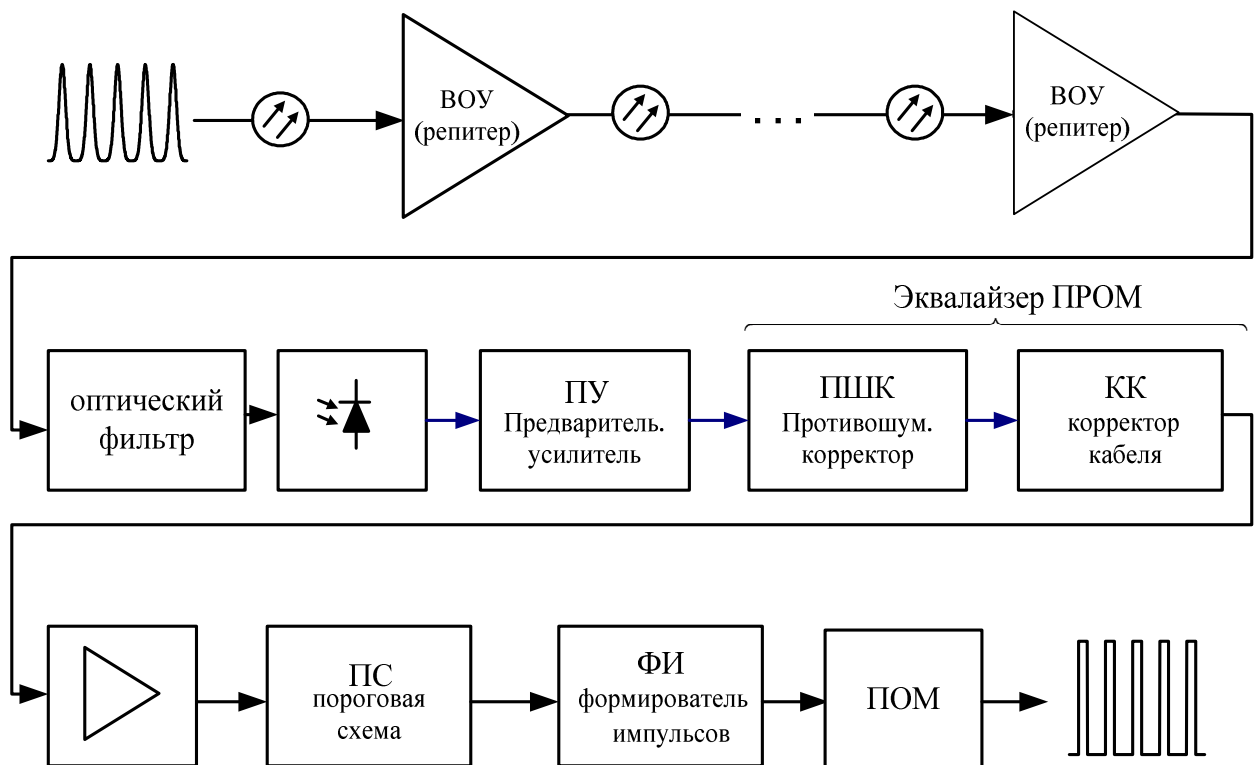


Рис. 3.1

- Энергетический бюджет:

$$P_{ПОМ}, \text{дБ} - P_{\min}, \text{дБ} = \alpha \cdot L, \quad (3.1)$$

где  $\alpha$ [дБ/км],  $L$  - затухание и длина ОВ,  $P_{ПОМ}$ ,  $P_{\min}$  – пиковая мощность световых импульсов на выходе передающего оптического модуля (ПОМ) и чувствительность приемного оптического модуля (ПРОМ) соответственно.

- Скоростной бюджет ВОСП

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \tau_i^2}, \quad (3.2)$$

<sup>1</sup> Раздел написан с участием А.С. Задорина

где  $\tau_{\Sigma}$  - общее быстродействие системы;  $\tau_i$  - быстродействие отдельных компонент ВОСП.

В случае NRZ – кода допустимое время нарастания и спада  $\tau_{\Sigma}$  может достигать 70% от периода, т.е.:

$$\tau_{\Sigma} \leq \frac{0.7}{B}, \quad (3.3)$$

где  $B$  – битовая скорость. Для бифазных кодов:

$$\tau_{\Sigma} \leq \frac{0.35}{B}. \quad (3.4)$$

Составляющими суммы в (3.2) являются:

- быстродействие ПОМ и его контроллера  $\tau_{\text{пом}}$ ;
- быстродействие ПРОМ  $\tau_{\text{пром}}$ ; - быстродействие ОК:

$$\tau_{\text{ОК}} = \sqrt{\tau_X^2 + \tau_{\text{ММ}}^2}; \quad \tau_{\text{ММ}} = \frac{0.44 \cdot L^{0.8}}{\Delta f_{\text{ОК}}}, \quad (3.5)$$

где  $D$ - коэффициент хроматической дисперсии ОВ;  $\tau_{\text{ММ}}$  - уширение оптического сигнала, связанное с межмодовой дисперсией в многомодовом ОВ;  $\Delta f_{\text{ОК}}$  - полоса частот ОВ длиной 1км, которая является справочной величиной.

- В условиях, когда чувствительность РЛ определяется тепловым шумом с гауссовой статистикой его коэффициент битовых ошибок  $p_{\text{ош}}$  определяется формулой:

$$p_{\text{ОШ}} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left[ \frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \right], \quad (3.6)$$

где  $\Phi(x)$ - табулированная функция ошибок  $\Phi(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^X e^{-x^2} dx$  (3.7)

- Распространенная аппроксимация функции ошибок:

$$p_{\text{ОШ}} \cong 0.65 \exp \left[ -0.443 \cdot (Q + 0.75)^2 \right]. \quad (3.8)$$

- Величина  $p_{\text{ош}}$  полностью определяется Q-фактором помехоустойчивости ЦСП:

$$Q = \frac{U_1 - U_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (3.9)$$



где  $U_1, U_0$  - средние уровни напряжений на выходе фотоприемника на тактовых интервалах (ТИ) длительностью  $T = \frac{1}{B}$  при передаче 1 и 0 соответственно;  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$  - среднеквадратичные уровни шумовых напряжений на указанных ТИ.

- Выражение (3.9) справедливо, если пороговый уровень  $U_{nop}$  решающего устройства ПРОМ установлен равным:

$$U_{nop} = \sigma_0 Q + U_0. \quad (3.10)$$

- Параметры  $U_1, U_0, \sigma_1$  и  $\sigma_0$  в выражении для  $Q$ -фактора шумящего ПУ можно выразить через соотношение чисел сигнальных и шумовых фотоэлектронов на анализируемом ТИ:

$$Q = \frac{\eta n_c}{\sqrt{2I_2 \left( \sqrt{M^2 F(M)(G\eta n_c + n_{TT}) + \frac{W^2}{M^2}} + \sqrt{M^2 F(M)(G\eta n_c + n_{TT}) + \frac{W^2}{M^2}} \right)}}, \quad (3.11)$$

где  $n_c$  - среднее число сигнальных фотоэлектронов на ТИ:

$$n_c = \eta \frac{P_c}{h\nu} \cdot T \cdot M \quad (3.12)$$

$\eta, M, F(M)$  - квантовая эффективность коэффициент лавинного умножения и коэффициент шума лавинного ФД. Для  $p$ - $i$ - $n$  диода  $F(M)=1$ . Для ЛФД:

$F(M) \approx M^x$ , где:

$$x = \begin{cases} 0.3, \text{ для } - Si, \\ 0.7, \text{ для } - InGaAs, \\ 1, \text{ для } - Ge. \end{cases} \quad (3.13)$$

$P_c$  - мощность оптического сигнала;  $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж/Гц – постоянная Планка;

$$n_{TT} = \frac{i_{TT} \cdot T}{e} \quad (3.14)$$

- среднее число фотоэлектронов темнового тока  $i_{TT}$  ФД на ТИ, определяющее его дробовой шум;  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $T$  – длительность ТИ;  $G$  - суммарный коэффициент шума репитеров (БОУ) регенерационного участка длиной  $L$ ,

$$G = 1 + 2n_{cn} \cdot \frac{L}{L_{cezm}} (\exp(\alpha L_{cezm}) - 1), \quad (3.15)$$

где  $L_{cezm}$  - расстояние между волоконно-оптическими усилителями (ВОУ);  $\alpha$  - коэффициент затухания сигнала в ОВ;

$n_{cn}$  - коэффициент инверсии ВОУ, определяющий его шумовые свойства;

$$W(\alpha) = \frac{S_I}{e^2 B} + \frac{4kt}{R \cdot e^2 B} + \frac{S_E}{e^2 B} \left[ \frac{1}{R^2} + (2\pi C)^2 \frac{I_3(\alpha)}{I_2(\alpha)} B^2 \right] \quad (3.16)$$

- безразмерный температурный параметр, определяющий уровень шумов входной цепи и усилителя ПРОМ;  $t$  - температура в градусах Кельвина;  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана; где  $S_I, S_E$  - шумовые параметры транзисторов (см. ниже).

Величина  $R$  в (3.16) определяет номинал нагрузочного резистора интегрирующего ПУ или сопротивления обратной связи ТИУ. Емкость же  $C$  складывается из выходной емкости фотодиода, входной емкости ПУ и емкости монтажа.

В формуле (3.16) коэффициенты  $I_2, I_3$  в, называемые интегралами Персонака, устанавливают соотношение между эффективной шумовой полосой частот ПУ  $B_{эф}$  и битовой скоростью  $B$ :

$$B_{эф} = BI_2 + C^2 R^2 B^3 I_3. \quad (3.17)$$

При этом второе слагаемое (3.17) определяет уширение  $B_{эф}$ , связанное с воздействием на помехоустойчивость ПРОМ внутреннего источника шумового напряжения  $e_a(t)$  предварительного усилителя ПРОМ (см. рис.3.6). Коэффициенты  $I_2, I_3$  выражается через отношение спектров огибающей оптического сигнала на выходе ( $H'_{блх}(\Omega)$ ) и входе ( $H_{блх}(\Omega)$ ) ПУ. Аргументом этих зависимостей является безразмерная нормированная частота  $\Omega = \omega / T$ :

$$I_2 = \int_0^\infty \left| \frac{H'_{блх}(\Omega)}{H_{блх}(\Omega)} \right|^2 d\Omega, \quad (3.18)$$

$$I_3 = \int_0^\infty \left| \frac{H_{блх}(\Omega)}{H_P(\Omega)} \right|^2 \Omega^2 d\Omega. \quad (3.19)$$

- Спектр  $H_{\text{ex}}(\Omega)$  в (3.18),(3.19) определяется формой оптического сигнала на входе ПРОМ  $P_c(t)$ , которая чаще всего близка к гауссовой кривой:

$$P_c(t) = \frac{P_0}{\sqrt{2\pi\alpha}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\alpha^2 T^2}\right), \quad (3.20)$$

где  $\alpha$ - параметр формы сигнала (см. рис.3.2). Вследствие частотных ограничений АЧХ линейного тракта  $H(f)$  сигнал  $P_c(t)$  на выходе ПРОМ отличается от (3.20). Обычно указанные отклонения используют для минимизации межсимвольной интерференции. Именно этим условием и регламентируется форма АЧХ  $H(f)$  цифрового ПРОМ.

- Таким свойством, например, обладает тракт с характеристикой  $H(f)$  вида «приподнятого косинуса»:

$$H(f) = \frac{1 + \cos\left(\frac{\pi f}{T}\right)}{2}, \quad (3.21)$$

которая получила широкое распространение на практике. Для сигналов гауссовой формы и АЧХ вида (3.21) зависимость интегралов Персонаика  $I_2, I_3$  от параметра формы гауссового сигнала  $\alpha$  изображена на рис.3.3.

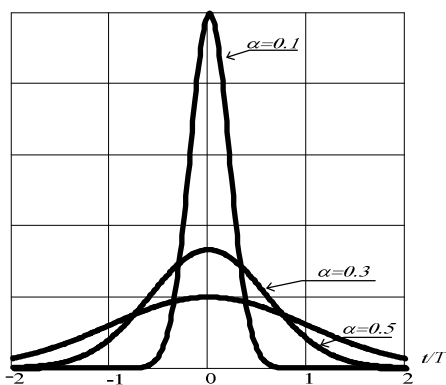


Рис.3.2.

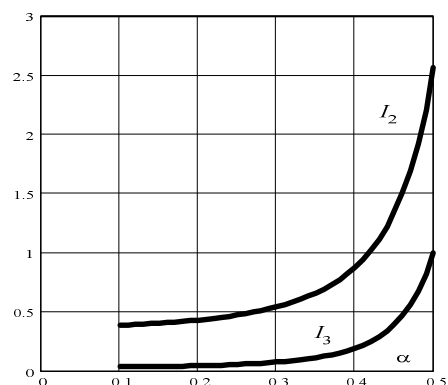


Рис.3.3

- Важной характеристикой ЛР является входящий в формулу (3.10) коэффициент уширения сигнала  $\gamma$  относительно длительности ТИ. Он описывает дисперсионные искажения цифрового сигнала в ОВ и численно равен доле сигнальных фотоэлектронов рассеянных за пределы «своего» ТИ. Эта доля и

определяет дисперсионное уширение импульса на величину  $\Delta t$  :

$$\gamma \cong \frac{\Delta t}{T}. \quad (3.22)$$

Для сигналов гауссовой формы рассчитанная по зависимости параметра  $\gamma$  от  $\alpha$  изображена на рис.3.5.

- В одномодовых оптических волокнах (ОВ):

$$\Delta t = D \cdot L \cdot \Delta \lambda, \quad (3.23)$$

где  $D \left[ \frac{нс}{км \cdot нм} \right]$  - дисперсионный коэффициент ОВ;  $L$  – длина линии связи;  $\Delta \lambda$  - ширина спектра оптического сигнала.

Значения коэффициента  $D$  стандартизовано требованиями МСЭ-Т (ITU-T) и соответствует данным рисунка 3.4. Здесь используются обозначения: DSF (Dispersion Shift Fiber)- ОВ со смещенной дисперсией; NDSF (Non Dispersion Shift Fiber) – стандартное волокно с несмещенной дисперсией; NZ-DSF (Non Zero Dispersion Shift Fiber) – волокно с ненулевой смещенной дисперсией.

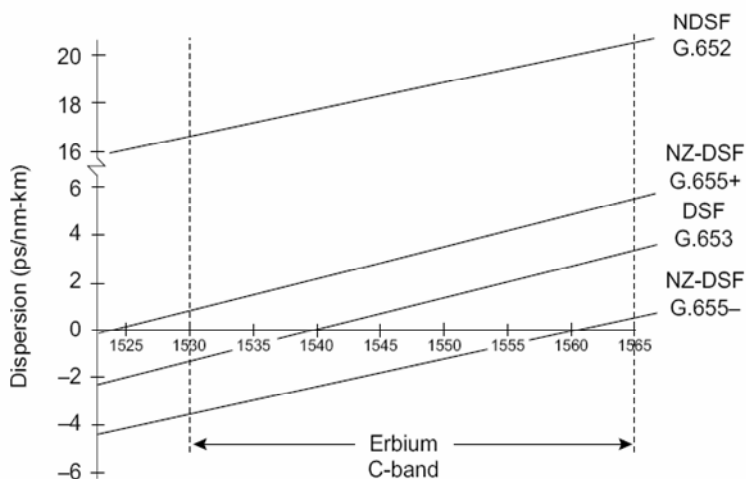


Рис.3.4 -Требования на уровень дисперсии в ОВ различного типа

- Для многомодового ОВ со ступенчатым профилем:

$$\Delta t = \frac{L \cdot \xi \cdot \Delta n}{c}, \quad (3.24)$$

где  $\Delta n$  - разность показателей преломления сердцевины  $n_0$  и оболочки  $n_1$  ОВ:

$$\Delta n = n_0 - n_1 = \frac{NA^2}{2n_0}, \quad (3.25)$$

$NA$  – числовая апертура ОВ;  $\xi$  - параметр связи мод (если связи нет, то  $\xi = 1$ ;

полная связь-  $\xi = \frac{1}{2}$ ).

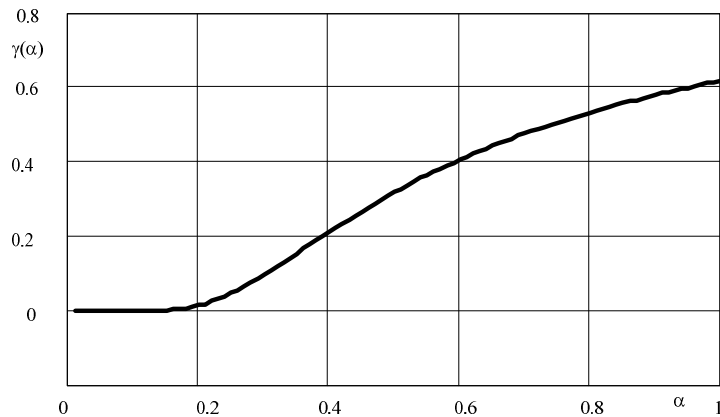


Рис.3.5 - Зависимость коэффициента уширения  $\gamma$  от параметра  $\alpha$  сигнала гауссовой формы

- Для многомодового градиентного ОВ:

$$\Delta t = \frac{L}{2c} \cdot \frac{\Delta n^2}{n_1}. \quad (3.26)$$

• Теоретическое ограничение на минимальную ширину линии излучения лазера  $\Delta\lambda$  в (3.23). Если излучение идеального лазера ( $\Delta\lambda = 0$ ) модулируется со высокой скоростью  $B$ , то линия излучения уширится на величину:

$$\Delta\nu \cong \frac{1}{2T} = \frac{B}{2}.$$

Откуда, учитывая, что  $\Delta\nu = \frac{c_0}{\lambda^2} \Delta\lambda$ , получим:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2c} \cdot B. \quad (3.27)$$

Из (3.27) следует, что уширение линии излучения, связанное с модуляцией ЛД, при скорости  $B \sim 10$  Гбит/с превышает ширину спектра немодулированного излучения DBF – лазера и этот эффект следует учитывать при расчете МСИ-1.

- Для ПУ на полевых транзисторах (ПТ):

$$\begin{cases} S_I \cong 2eI_3; \\ S_E \cong \frac{4kt^0\Gamma}{g_m}, \end{cases} \quad (3.28)$$

где  $I_3$  - ток утечки затвора ПТ;  $\Gamma$  – коэффициент шума ПТ;  $g_m$  – проводимость канала ПТ.

- Для ПУ на биполярных транзисторах (БПТ):

$$S_I = 2eI_{BX} = \frac{2kt^0}{R_{BX}} \left[ \frac{A^2}{\Gamma_u} \right],$$

где  $R_{BX}$  - входное сопротивление каскада ПУ.

$$R_{BX} = \frac{kt^0}{eI_{BX}},$$

где  $I_{BX}$  - ток базы ПУ в рабочей точке.

$$S_E = \frac{2kt^0}{\beta} \cdot R_{BX} \left[ \frac{B^2}{\Gamma_u} \right],$$

где  $\beta$  – коэффициент усиления по току БПТ.

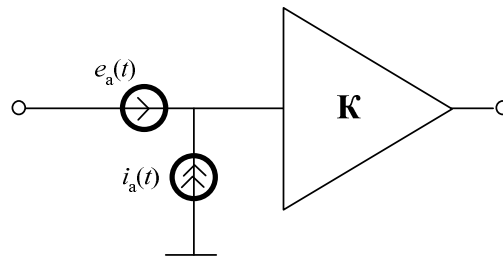


Рис.3.6.

- Таблица 3.1 - Типовые параметры полевых транзисторов на основе барьера Шотки (ПТШ)

Параметр	<i>Si</i> – ПТШ	<i>GaAs</i> – ПТШ
$g$ , мСм	5-10	15-50
$C_{СИ}$ , пФ	3-6	0,2-0,5
$C_{ЗИ}$ , пФ	0,5-1	0,01-0,05
$\Gamma$	1,5-3,0	1,1-1,75
$I_3$ , нА	0,01-0,1	10-100

- Шумовые напряжения, обусловленные внутренними шумами ПУ на его выходе пропорциональны параметрам  $S_I$ ,  $S_E$  и шумовой полосе частот  $B_{\text{эф}}$ :

$$\begin{cases} \langle U_{шE}^2 \rangle = S_I K^2 R^2 B I_2; \\ \langle U_{шI}^2 \rangle = S_E K^2 (B I_2 + C^2 R^2 B^3 I_3), \end{cases} \quad (3.30)$$

- Основные разновидности предварительных усилителей (ПУ) РЛ показаны на рис.3.7.

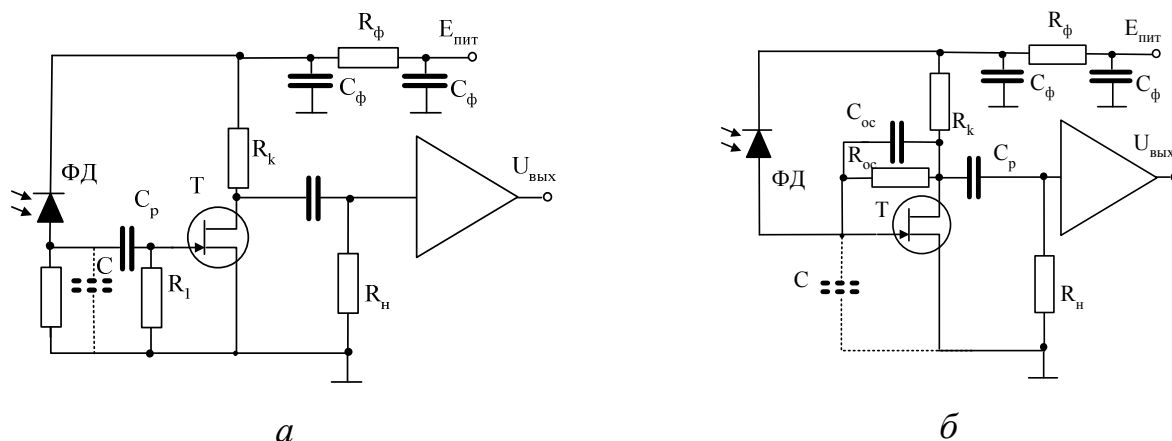


Рис.3.7 - Разновидности типов ПУ

а) высокоомный (интегрирующий) усилитель (ИУ);

б) трансимпедансный усилитель (ТИУ).

### Трансимпедансный усилитель (ТИУ) (рис. 3.7-б).

- ТИУ предназначен для преобразования фототока  $i_\phi$  в напряжение  $U_\phi = i_\phi \cdot R_{OC}$ .

Параметры ТИУ:

- входное сопротивление  $R_{BX} \cong \frac{R_{OC}}{|K|}$ ;

- выходное сопротивление  $R_{ВЫХ} \cong R_{OC}$ ;

- полоса частот ТИУ ограничивается как инерционностью нагрузки, так и частотными характеристиками усилителя (транзистора). В первом случае, при  $K \gg 1 + R_{OC} / R$  частотная зависимость выходного напряжения ТИУ имеет вид:

$$U = - \frac{MR_{OC}I_C}{1 + j2\pi f \frac{CR_{OC}}{K}}, \quad (3.31)$$

где  $K$  - коэффициент усиления каскада ТИУ при разомкнутой петле обратной связи,  $M$  – коэффициент лавинного умножения ЛФД;  $I_C$  – фототок фотодиода. В данных условиях:

$$\Delta f \cong 0.16 \frac{|K|}{R_{OC} \cdot C}.$$

Частотные свойства активного элемента усилителя можно охарактеризовать площадью усиления  $G_a$ , равной произведению коэффициента усиления на ширину АЧХ при разомкнутой цепи обратной связи. Достижение максимальной ширины АЧХ  $\Delta f$ , при заданной  $G_a$ , обеспечивается выбором оптимальных номиналов элементов обратной связи ТИУ  $R_{OC}$  и  $C_{OC}$ , обеспечивающих декремента затухания цепи ОС ОУ  $\gamma$  приблизительно равный 1. Это достигается регулировкой сначала  $R_{OC}$ . При малых  $R_{OC}$  параметр  $\gamma$  также мал. При этом вблизи резонансная частоты  $f_r$  на АЧХ формируется характерный выброс. Для его подавления сопротивление ОС  $R_{OC}$  увеличивают до тех пор, пока  $\gamma$  приблизительно не сравняется с 1. В этом случае ширина АЧХ  $\Delta f$  будет максимальна. При дальнейшем увеличении сопротивления ОС  $\Delta f$  будет снижаться. Включение  $C_{OC}$  позволяет дополнительно несколько расширить АЧХ.

- Особенностью **интегрирующего предварительного усилителя** ПРОМ (рис. 3.7-а) является высокоомная нагрузка ФД и связанные с этим значительные частотные искажения сигнала в области высоких частот. Для компенсации этих искажений в состав ПУ вводится выравнивающий фильтр (рис.3.8). В итоге ПУ представляется двухзвенным активным фильтром, состоящим из интегрирующего (I), и выравнивающего (II) (противошумовой корректор) звеньев.



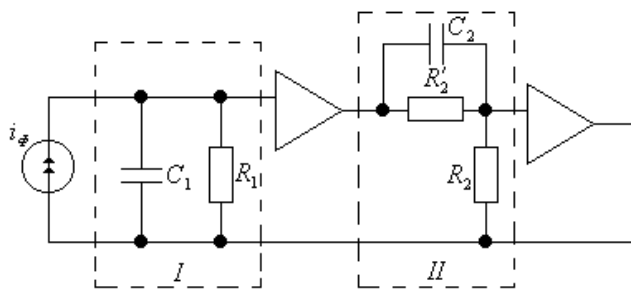


Рис. 3.8

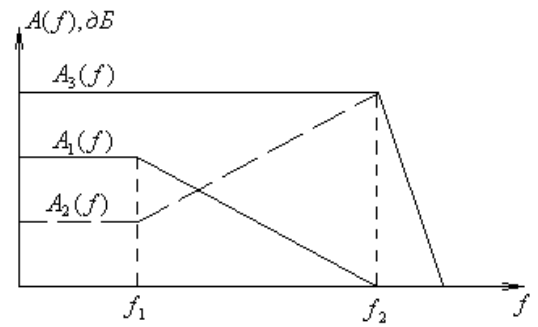


Рис. 3.9

Вид АЧХ  $A_2(f)$  корректора  $A_1(f)$  и подбирается таким образом, чтобы компенсировать спад АЧХ входной цепи  $A_1(f)$  в пределах полосы частот  $f_1 - f_2$  (рис. 3.9), и таким образом обеспечить требуемую полосу частот ПУ  $\Delta f$ . Указанная компенсация достигается при следующих соотношениях между параметрами элементов входной цепи и ПК:

$$\begin{cases} R_1 C_1 = R_2' C_2; \\ m a_1 = 1, \end{cases} \quad (3.32)$$

где  $m = f_2 / f_1$  - коэффициент расширения АЧХ;

$$a_1 = R_2 / R_2' \ll 1; \quad f_1 = 1 / (2\pi R_1 C_1). \quad (3.33)$$

- Таблица 3.2 - Средние значения параметров оптических волокон ЦВОСП

Тип ОВ	марка ОВ	$\alpha$ , дБ/км.	$\lambda$ , мкм	$D$ , пс/нм·км	$\Delta F$ , МГц·км
single mode fibers (SMF)	ОЗКГ-01	0.7	0.85		800
	ОЗКГ-11	0.7-1	0.85		800
	ОМЗКГ-10	0.4	0.85		5000
		0.3-0.4	1.3	1.8	
		0.1-0.25	1.55	17.5	
multi mode fibers GF-MMF (gradient index)	ОК-50-2-5	5	0.85		250-500
	ОК-50-2-5	2-3	0.85		250-500

## 3.2 Примеры решения задач

### Задача № 3.1

Цифровой сигнал в форме NRZ – кода передается по ВОЛС со скоростью  $V = 10^6$  бит/с методом модуляции на длине волны  $\lambda = 0.85$  мкм. После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha = 0,1$ . Полагая, что сквозная АЧХ ПРОМ имеет вид “приподнятого косинуса”, оценить чувствительность ПРОМ для коэффициента битовых ошибок  $p_{ош} = 10^{-6}$ , считая, что основной ПУ является интегрирующим усилителем, в первом каскаде которого используется Si – ПТШ. Светочувствительным элементом ПРОМ является  $p-i-n$  диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0,8$ , темновым током  $i_{тТ} = 10$  нА и нагруженным на сопротивление  $R = 1$  МОм. Оценить номиналы элементов ПШК, полагая, что емкость ФД и входного каскада ПУ равна 5 пФ.

### Решение

- По условию задачи АЧХ ПРОМ такова, что МСИ – 1 в системе могут быть полностью устранены, т.е.  $\gamma = 0$ .

- Для указанного параметра формы  $\alpha = 0,1$  световой импульс на входе ПРОМ не растянут, а наоборот сжат относительно длительности ТИ (см. рис.3.2). По этой причине при формировании заданной АЧХ в блоке КК необходимо подавлять высокие частоты в спектре светового сигнала. В результате шумовые полосы частот  $B_{\text{ЭФ1}}$  и  $B_{\text{ЭФ2}}$  для шумов входной цепи и источников шума ПУ будут меньше, чем  $B$ , поскольку поправочные коэффициенты Персонака  $I_2$  и  $I_3$  для  $B_{\text{ЭФ}}$  (согласно рис.3.3) будут равны:  $I_2 \cong 0.4$ ;  $I_3 \cong 0.05$ .

- Для заданного уровня  $p_{ош}$  из (3.8) находим  $Q$  – параметр:

$$p_{ош} \cong 0.65 \cdot e^{[-0.443(Q+0.75)^2]} = e^{[-0.443(Q+0.75)^2 - 0.43]} = 10^{-6} = e^{-13.8}; \quad \rightarrow Q \cong 4.747.$$

- Из (3.13), (3.14) находим эквивалентные числа фотоэлектронов  $n_{тТ}$  и  $n_t$  на ТИ:

$$n_{TT} = \frac{i_{TT} \cdot T}{e} = \frac{10^{-8}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^6} = 6.25 \cdot 10^4;$$

$$n_t = \frac{2kt}{q^2 \cdot R \cdot B} = \frac{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{(1.6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 10^6 \cdot 10^6} = 3.234 \cdot 10^5.$$

• Для отыскания числа шумовых фотоэлектронов  $n_E$  и  $n_I$  на ТИ, связанных с шумами  $S_i$  – ПТШ воспользуемся формулой (3.29) и данными таблице 3.1, согласно которым  $I_3=0,1$  нА;  $g=10$  мСм;  $\Gamma=3$ ,

$$n_I = \frac{S_I T}{2q^2} = \frac{I_3 T}{e} = \frac{10^{-10} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 6.25 \cdot 10^2;$$

$$n_E = \frac{S_E T}{2q^2 R^2} = \frac{2kt \cdot \Gamma \cdot T}{q^2 R^2 g_m} = \frac{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{(1.6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-2}} \cong 10^2.$$

• Поскольку  $\gamma=0$ , то число сигнальных фотоэлектронов  $n_C$ , удовлетворяющих заданному уровню  $Q$  будет определяться формулой (3.28):

$$n_C = 2I_2 Q^2 + 2 \cdot \sqrt{2 \cdot I_2} \cdot Q \cdot \sqrt{n_{TT} + n_t + n_E + n_I (1 + C^2 R^2 B^2 \cdot I_3 / I_2)};$$

Подставляя сюда найденные значения  $n_{TT}$ ,  $n_t$ ,  $n_E$  и  $n_I$  получим:

$$n_C = 2 \cdot 0.4 \cdot 4.747^2 + 2 \cdot \sqrt{2 \cdot 0.4} \cdot 4.747 \cdot \sqrt{6.25 \cdot 10^4 + 3.234 \cdot 10^5 + 10^2 + 625(1 + (5 \cdot 10^{-12} \cdot 10^6 \cdot 10^6)^2 \cdot \frac{0.05}{0.4})} \cong 5.311 \cdot 10^3$$

• Из формулы (3.12) находим искомую чувствительность ПРОМ  $P_{\min}$ :

$$P_{\min} = \frac{n_C \cdot h\nu}{\eta \cdot T} = \frac{n_C \cdot h \cdot c \cdot B}{\eta \cdot \lambda} = \frac{5.311 \cdot 10^3 \cdot 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^6}{0.8 \cdot 0.85 \cdot 10^{-6}} = 1.551 \text{ нВт},$$

$$P_{\min} = -58.094 \text{ дБм}.$$

• Расчет корректора ПШК.

Для скорости  $B=10^6$  бит/с по теореме Найквиста требуется полоса частот

$$\Delta f = \frac{B}{2} = \frac{10^6}{2} = 500 \text{ кГц}.$$

• Отсюда следует, что граничная частота входной цепи равна:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C_{BX}} = \frac{1}{6.28 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-12}} = 31.831 \text{ кГц.}$$

- Требуемый коэффициент расширения спектра:

$$m = \frac{\Delta f}{f_1} = \frac{500}{31.831} = 15.708.$$

- Полагая, что

$$\left. \begin{aligned} R_1 + R_2 &= 100 \text{ кОм} \\ \frac{R_1}{R_2} &= m \end{aligned} \right\},$$

находим:  $R_2(m+1) = 100 \text{ кОм}$ . Следовательно:

$$R_2 = \frac{100 \text{ кОм}}{m+1} = \frac{100 \text{ кОм}}{16.708} = 5.985 \text{ кОм}; \quad R_1 = m \cdot R_2 = 15.708 \cdot 5.985 = 94.012 \text{ кОм.}$$

- Емкость  $C_1$  находится из условия (32):

$$R_1 C_1 = R_H C.$$

Откуда: 
$$C_1 = \frac{R_H C}{R_1} = \frac{10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-12}}{94.012 \cdot 10^3} = 53.185 \text{ пФ.}$$

### Задача № 3.2

Оценить коэффициент битовых ошибок в ЦВОСП, если линия длиной 40 км изготовлена из ОВ GF-MMF ОК-50-2-3, мощность оптического сигнала ПОМ, вводимого в ОВ равна 20 дБм. Скорость передачи  $V = 10$  Мбит/с, а параметры ПРОМ соответствуют условиям задачи №3.1. Оценить номиналы элементов ПШК.

### Решение

- Энергетический бюджет ЦВОСП равен:  $P_{ПОМ} - P_{\min} = \alpha_B \cdot L$ .

Отсюда находим уровень оптического сигнала на входе ПРОМ:

$$10 \cdot \log \left[ \frac{P_{ПОМ} / 10^{-3}}{P_{\min}} \right] = P_{ПОМ} - P_{\min} + 30 = \alpha_B \cdot L;$$

$$P_{\min} [\text{дБм}] = P_{\text{ПРОМ}} [\text{дБм}] - \alpha_B \cdot L[\text{дБ}] = 20 - 1,5 \cdot 40 = -40 [\text{дБм}]$$

- Определим уширение импульсов  $\Delta\tau$  на входе ПРОМ

$$\Delta\tau = \sqrt{\tau_{\text{ПРОМ}}^2 + \tau_{\text{ОК}}^2} - \tau_{\text{ПРОМ}} = \sqrt{\left[\frac{0.7}{B}\right]^2 + \left[\frac{0.44 \cdot L^{0.8}}{\Delta f_{\text{ОК}}}\right]^2} - \frac{0.7}{B} =$$

$$\sqrt{\left[\frac{0.7}{10^7}\right]^2 + \left[\frac{0.44 \cdot (40 \cdot 10^3)^{0.8}}{250 \cdot 10^6 / 10^3}\right]^2} - \frac{0.7}{10^7} \cong 5.089 \cdot 10^{-10} \text{ с.} = 0.509 \text{ нс.}$$

- Находим коэффициент рассеяния сигнала на ТИ:

$$\gamma \cong \frac{\Delta\tau}{T} = \frac{0.509 \cdot 10^{-9}}{10^{-7}} = 5.09 \cdot 10^{-3}$$

- По графику рис.3.5 находим, что коэффициент формы сигнала  $\alpha \cong 0.1$ .

- Из рис.3.3 для  $\alpha=0.1$  находим, что поправочные коэффициенты  $I_2, I_3$  для расчета шумовой полосы частот (интегралы Персонака) равны:  $I_2(0.1) \cong 0.4$ ;  $I_3(0.1) \cong 0.05$ .

- По формулам (3.13-3.16) находим эквивалентные числа фотоэлектронов  $n_c, n_{TT}, n_t, n_E, n_I$  на ТИ:

$$n_c = \eta \frac{P_c}{h\nu} \cdot T = \eta \frac{P_c \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot B} = 0.8 \cdot \frac{10^{-10} \cdot 0.85 \cdot 10^{-6}}{6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^7} \cong 34.24;$$

$$n_{TT} = \frac{i_{TT} \cdot T}{e} = \frac{10^{-8} \cdot 10^{-7}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 6.25 \cdot 10^3;$$

$$n_t = \frac{2kt \cdot T}{q^2 \cdot R} = \frac{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 10^{-7}}{(1.6)^2 \cdot 10^{-38} \cdot 10^6} = 3.234 \cdot 10^4;$$

$$n_I = \frac{I_3 T}{e} = \frac{10^{-10} \cdot 10^{-7}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 62.5;$$

$$n_E = \frac{S_E T}{2q^2 R^2} = \frac{2kt \cdot \Gamma \cdot T}{q^2 R^2 g_m} = \frac{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 3 \cdot 10^{-7}}{(1.6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-2}} \cong 10.$$

Подставляя эти значения в (3.11), находим  $Q$  – фактор ЦВОСП:

$$Q = \frac{n_C(1-2\gamma)}{\sqrt{2I_2} \left( \sqrt{F(M)(n_C + n_{TT}) + \frac{(n_t + n_{Ia} + n_{Ea}(1 + C^2 R^2 B^2 \cdot I_3/I_2))}{M^2}} + \right.}$$

$$\left. \frac{0.093}{\sqrt{F(M)((1-\gamma)n_C + n_{TT}) + \frac{(n_t + n_{Ia} + n_{Ea}(1 + C^2 R^2 B^2 \cdot I_3/I_2))}{M^2}}} \right)}$$

Далее по формуле (3.8) находим коэффициент ошибок системы:

$$p_{ош} \cong \exp[-0.443 \cdot (Q + 0.75)^2 - 0.43] = 10^{0.434[-0.443 \cdot (0.093 + 0.75)^2 - 0.43]} \cong 0.475.$$

### Задача № 3.3

Предложить состав и схему размещения оборудования участка цифрового линейного тракта, построенного на основе аппаратуры одноволновой двухволоконной однокабельной ВОСП, предназначенной для передачи сигнала STM – 4 в формате NRZ – кода на длине волны  $\lambda=1340$  нм, на расстоянии 800 км. Определить  $P_{min}$  ПРОМ, для коэффициента битовых ошибок  $p_{ош}=10^{-7}$ , считая, что используется Si – ПТШ и лавинный фотодиод (ФД), работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0,85$ , коэффициентом лавинного размножения  $M=10$ , темновым током  $i_{т}=10$  нА и нагруженный на сопротивление  $R=50$  кОм, а волоконно-оптические усилители (репитеры) системы характеризуются коэффициентом инверсии населённости, равным 1,5.

### Решение

Дано:  $\lambda=1340$  нм;  $B=622$  Мбит/с;  $L=800$  км;  $p_{ош}=10^{-7}$ ; Si-ПТШ ( $g=10$  мСм,  $I_3=0,1$  нА,  $\Gamma=3$ );  $\eta=0,85$ ;  $M=10$ ;  $i_{т}=10$  нА;  $R=50$  кОм.

Найти:  $P_{min}=?$

Найдём поправочные коэффициенты Персонака  $I_2$  и  $I_3$ ;  $\alpha=0,1$  световой импульс на входе ПРОМ не растянут, т.к.  $\gamma=0$ .

$$I_2(\alpha) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{16\alpha^2 \cdot x^2} (\cos(x))^4 dx, \quad I_2(\alpha) = 0,404,$$

$$I_3(\alpha) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{16\alpha^2 \cdot x^2} x^2 \cdot (\cos(x))^4 dx, \quad I_3(\alpha) = 0,036.$$

Найдём эквивалентные числа фотоэлектронов  $n_{tt}$  и  $n_t$  на ТИ:

$$n_{tt} = \frac{i_{tt} \cdot T}{e} = \frac{i_{tt} \cdot \frac{1}{B}}{e} = \frac{10 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1}{622 \cdot 10^6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 100,482$$

$$n_t = \frac{2 \cdot k \cdot t}{e^2 \cdot R \cdot B} = \frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 622 \cdot 10^6} = 1,016 \cdot 10^4$$

Для отыскания числа шумовых фотоэлектронов  $n_E$  и  $n_I$  на ТИ, связанных с Si-ПТШ, воспользовавшись табличными данными, получим

$$n_I = \frac{I_3 \cdot T}{e} = 1,005 \cdot 10^3$$

$$n_E = \frac{2 \cdot k \cdot t \cdot \Gamma \cdot T}{e^2 \cdot R^2 \cdot g} = 7,11$$

Для заданного уровня  $p_{out}$   $Q$  – фактор равен:

$$p_{out} = 10^{0,434[-0,443(Q+0,75)^2 - 0,43]}.$$

Тогда  $Q = 6,021$ .

Поскольку  $\gamma = 0$ , то число сигнальных фотоэлектронов  $n_c$ :

$$n_c = 2 \cdot I_2 \cdot Q^2 + 2 \cdot \sqrt{2 \cdot I_2} \cdot Q \cdot \sqrt{n_{tt} + n_t + n_E + n_I \cdot \left(1 + C^2 \cdot R^2 \cdot B^2 \cdot \frac{I_3}{I_2}\right)},$$

где  $C = \frac{1}{B \cdot R}$ .

Подставляя в эту формулу все полученные значения, получим:  $n_c = 1,1835 \cdot 10^3$

Находим искомую чувствительность ПРОМ  $P_{min}$ :

$$P_{min} = \frac{n_c \cdot h \cdot c \cdot B}{\eta \cdot \lambda} = \frac{1,1835 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 622 \cdot 10^6 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34}}{0,85 \cdot 1340 \cdot 10^{-9}} = 1,284 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$$

$$P_{min} = -38,914 \text{ дБм}$$

Схема участка цифрового линейно тракта показана на рис.3.10.

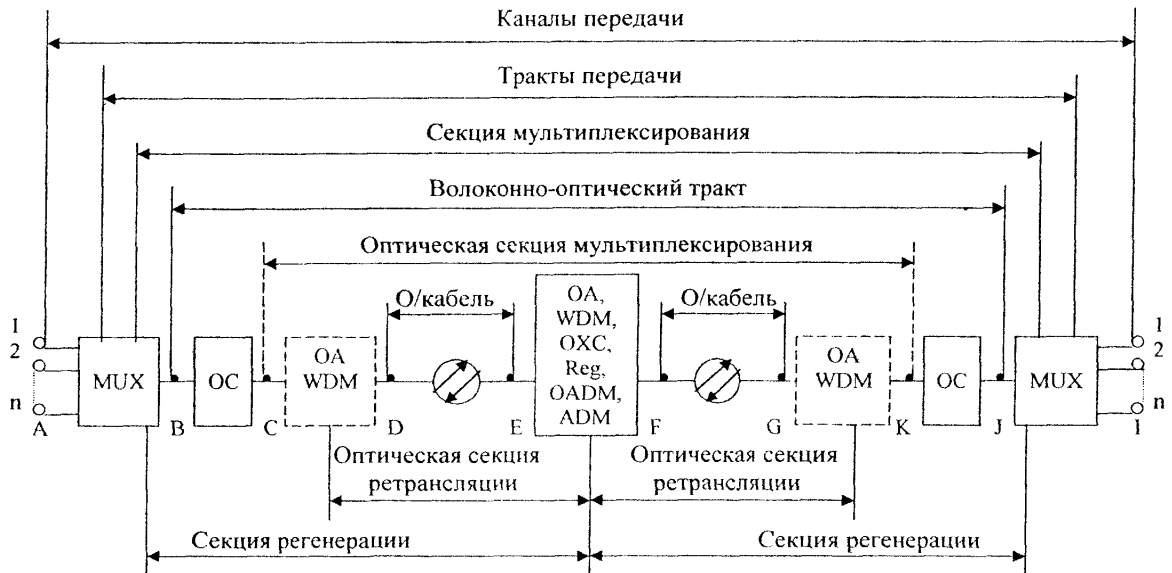


Рис. 3.10 - Схема участка цифрового линейного тракта.

### Задача № 3.4

Оценить чувствительность ПРОМ для коэффициента битовых ошибок  $P_{oui} = 10^{-8}$ , считая, что основой ПУ является интегрирующий усилитель, в первом каскаде которого используется Si – ПТШ. Цифровой сигнал в форме NRZ – кода передается по ВОЛС со скоростью  $B=10^7$  бит/с методом модуляции на длине волны  $\lambda=0.95$  мкм. После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha = 0.1$ , а сквозная АЧХ ПРОМ имеет вид “приподнятого косинуса”. Светочувствительным элементом ПРОМ является p-i-n диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.8$ , темновым током  $i_{mt}=10$  нА и нагруженным на сопротивление  $R=1$  Мом. Оценить номиналы элементов ПШК, полагая, что емкость ФД и входного каскада ПУ равна 10 пФ.

### Решение

Дано:  $B = 10^7$  бит/с; NRZ;  $\lambda = 950$  нм;  $L = 380$  км;  $P_{oui} = 10^{-8}$ ; Si – ПТШ; pin-диод;  $\eta = 0,8$ ;  $i_{TT} = 10$  нА;  $R = 1$  МОм;  $C = 10$  пФ.

Найти:  $P_{min} = ?$



Требуемые постоянные;

$$C = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}; h = 6.22 \cdot 10^{-34}; K = 1.38 \cdot 10^{-23}; T = 293 \text{ К}; q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha = 0,1$ .

Мы можем путём подбора прикинуть величину параметра  $Q$ . Используя формулу:

$$BER(Q) = 0,65 \cdot e^{-0,444(0,75+Q)^2},$$

получаем величину  $Q = 0,625$ .

Далее задаём параметры нашей системы: будем считать, что все устройства в линии работают при комнатной температуре, то есть  $t = 300 \text{ К}$ . Величину тактового интервала определим следующим образом:

$$T = \frac{1}{B} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Теперь, непосредственно, перейдём к нахождению параметров ПРОМ. Так как нам даны рin-диод и Si-ПТШ мы получаем по таблице значений:

$\Gamma = 1,5$  – коэффициент шума полевого транзистора;

$I_3 = 0,1 \cdot 10^{-9} \text{ А}$  – ток утечки затвора полевого транзистора;

$g_m = 7 \cdot 10^{-3} \text{ См}$  – проводимость канала полевого транзистора;

$C = 10 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$  – емкость перехода сток-исток полевого транзистора.

Среднее число электронов шумового источника тока:

$$n_i = \frac{I_3 T}{q} = \frac{0,1 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-7}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 62,5.$$

Среднее число фотоэлектронов шумового источника напряжения:

$$n_e = \frac{2 \cdot k \cdot t \cdot \Gamma \cdot T}{q^2 \cdot R^2 \cdot g_m} = \frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 10^{-7}}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot (1 \cdot 10^6)^2 \cdot 7 \cdot 10^{-3}} = 6,769 \cdot 10^4.$$

Рассчитываем интегралы Персоника:

$$I_2(\alpha) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{16 \cdot \alpha^2 \cdot x^2} (\cos(x))^4 dx, \quad I_2(\alpha) = 0,387,$$

$$I_3(\alpha) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{16\alpha^2 \cdot x^2} x^2 \cdot (\cos(x))^4 dx, \quad I_3(\alpha) = 0,033.$$

Находим шумовое число фотоэлектронов  $n_{tt}$  и  $n_t$  на ТИ:

Эквивалентное число электронов, связанные с тепловыми шумами:

$$n_t = \frac{2 \cdot k \cdot t \cdot T}{q^2 \cdot R} = \frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 1 \cdot 10^{-7}}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 1 \cdot 10^6} = 3.159 \cdot 10^4.$$

Эквивалентное число электронов, связанные с темновым током:

$$n_{tt} = \frac{i_{tt} \cdot T}{q} = \frac{10 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-7}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6250.$$

Выражение для  $Q$ -фактора ПУ можно выразить соотношением чисел сигнальных и шумовых фотоэлектронов на анализируемом ТИ:

$$Q = \frac{n_c(1-2\gamma)}{\sqrt{2}(\sqrt{(1-\gamma)n_c G + n_{TT} + n_t} + \sqrt{\gamma n_c G + n_{TT} + n_t})}.$$

Так как репитеры будут стоять в трассе таким образом, чтобы межсимвольные искажения 1-ого рода были сведены к минимуму, то величину  $\gamma$  (определяющее дисперсионные уширения импульса за пределы своего сигнального интервала) можно принять равной нулю.

Число сигнальных фотоэлектронов, принятых ПРОМ в течении времени  $T$ :

$$n_c = 2 \cdot I_2(\alpha) \cdot Q^2 + 2\sqrt{2I_2(\alpha)} \cdot Q \cdot \sqrt{n_t + n_{tt} + n_e + n_i} \cdot \left(1 + C^2 \cdot R^2 \cdot B^2 \frac{I_3(\alpha)}{I_2(\alpha)}\right) = 3 \cdot 10^3,$$

а минимальная мощность при этом будет:

$$P_{\min} = \frac{n_c \cdot h \cdot \nu}{h \cdot \lambda}; \quad P_{\min} = 7.87 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$$

Тогда величина  $P_{\min}$  в дБм будет: -51,038 дБм.

Расчет корректора ПШК.

Для скорости  $B=10^7$  бит/с по теореме Найквиста требуется полоса частот

$$\Delta f = \frac{B}{2} = \frac{10^7}{2} = 5 \text{ МГц.}$$

Отсюда следует, что граничная частота входной цепи равна:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C_{BX}} = \frac{1}{6.28 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-12}} = 15.92 \text{ кГц.}$$

Требуемый коэффициент расширения спектра:  $m = \frac{\Delta f}{f_1} = \frac{5000}{15.92} = 314.07.$

Полагая, что  $R_1 + R_2 = 100 \text{ кОм}$ ,  $R_1 / R_2 = m$ , находим:  $R_2(m + 1) = 100 \text{ кОм}$ .

Следовательно:

$$R_2 = \frac{100 \cdot 10^3 \text{ Ом}}{m+1} = \frac{100 \cdot 10^3 \text{ Ом}}{315.07} = 0,317 \text{ кОм}; \quad R_1 = m \cdot R_2 = 314.07 \cdot 0,317 = 99,56 \text{ кОм.}$$

Емкость  $C_1$  находится из условия:  $R_1 C_1 = R_H C$ . Откуда:

$$C_1 = \frac{R_H C}{R_1} = \frac{10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-12}}{99,56 \cdot 10^3} = 100 \text{ пФ.}$$

### 3.3 Задачи для самостоятельного решения

3.1. Предложить состав и схему размещения оборудования участка цифрового линейного тракта, построенного на основе аппаратуры одноволновой двухволоконной однокабельной ВОСП, предназначенной для передачи сигнала STM-16 в формате NRZ – кода на длине волны  $\lambda=1545$  нм, на расстояние 1000 км. Определить  $P_{min}$ : ПРОМ, для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош} = 10^{-6}$ , считая, что используется Si – ПТШ и p-i-n диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0,8$ , темновым током  $i_{tt} = 10 \text{ нА}$  и нагруженный на сопротивление  $R=1 \text{ Мом}$ , а волоконно-оптические усилители (репитеры) системы характеризуются коэффициентом инверсии населенностей, равным 1.5. Выбрать материал рабочих областей лазерного диода, пригодного для использования в указанной выше системе, и представить схему его конструкции

3.2. Предложить состав и схему размещения оборудования участка цифрового линейного тракта, построенного на основе аппаратуры одноволновой двухволоконной однокабельной ВОСП, предназначенной для передачи сигнала STM-4 в формате NRZ – кода на длине волны  $\lambda=1545$  нм, на расстояние 800 км.

Определить  $P_{min}$  ПРОМ, для коэффициента битовых ошибок  $P_{oui} = 10^{-7}$ , считая, что используется  $Si$  – ПТШ и  $p-i-n$  диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0.9$ , темновым током  $i_{tt} = 15$  нА и нагруженный на сопротивление  $R = 1$  Мом, а волоконно-оптические усилители (репитеры) системы характеризуются коэффициентом инверсии населенностей, равным 1.5.

3.3. Предложить состав и схему размещения оборудования участка цифрового линейного тракта, построенного на основе аппаратуры одноволновой двухволоконной однокабельной ВОСП, предназначенной для передачи сигнала STM-4 в формате NRZ – кода на длине волны  $\lambda = 1560$  нм, на расстояние 700 км. Определить  $P_{min}$  ПРОМ, для коэффициента битовых ошибок  $P_{oui} = 10^{-8}$ , считая, что используется  $GaAs$  – ПТШ и  $p-i-n$  диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0.85$ , темновым током  $i_{mm} = 15$  нА и нагруженный на сопротивление  $R = 1$  Мом, а волоконно-оптические усилители (репитеры) системы характеризуются коэффициентом инверсии населенностей, равным 2. Выбрать материал рабочих областей и предложить конструкцию ФД, пригодного для использования в указанной системе.

3.4. Предложить состав и схему размещения оборудования участка цифрового линейного тракта, построенного на основе аппаратуры одноволновой двухволоконной однокабельной ВОСП, предназначенной для передачи сигнала STM-16 в формате NRZ – кода на длине волны  $\lambda = 1560$  нм, на расстояние 1200 км. Определить  $P_{min}$  ПРОМ, для коэффициента битовых ошибок  $P_{oui} = 10^{-9}$ , считая, что используется  $GaAs$  – ПТШ и  $p-i-n$  диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0.85$ , темновым током  $i_{tt} = 15$  нА и нагруженный на сопротивление  $R = 1$  Мом, а волоконно-оптические усилители (репитеры) системы характеризуются коэффициентом инверсии населенностей, равным 2. Выбрать материал рабочих областей лазерного диода, пригодного для использования в указанной выше системе, и представить схему его конструкции.

3.5. Оценить чувствительность ПРОМ для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош} = 10^{-6}$ , считая, что основой ПУ является интегрирующий усилитель, в первом каскаде которого используется Si – ПТШ. Цифровой сигнал в форме NRZ – кода передается по ВОЛС со скоростью  $V = 10^7$  бит/с методом модуляции на длине волны  $\lambda = 0,85$  мкм. После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha = 0,1$ , а сквозная АЧХ ПРОМ имеет вид “приподнятого косинуса”. Светочувствительным элементом ПРОМ является p-i-n диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0,9$ , темновым током  $i_{т} = 10$  нА и нагруженным на сопротивление  $R = 1$  Мом. Оценить номиналы элементов ПШК, полагая, что емкость ФД и входного каскада ПУ равна 10 пФ.

3.6. Оценить чувствительность ПРОМ для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош} = 10^{-7}$ , считая, что основой ПУ является интегрирующий усилитель, в первом каскаде которого используется Si – ПТШ. Цифровой сигнал в форме NRZ – кода передается по ВОЛС со скоростью  $V = 10^6$  бит/с методом модуляции на длине волны  $\lambda = 0,85$  мкм. После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha = 0,1$ , а сквозная АЧХ ПРОМ имеет вид “приподнятого косинуса”. Светочувствительным элементом ПРОМ является p-i-n диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0,8$ , темновым током  $i_{т} = 15$  нА и нагруженным на сопротивление  $R = 1$  Мом. Оценить номиналы элементов ПШК, полагая, что емкость ФД и входного каскада ПУ равна 20 пФ.

3.7. Оценить чувствительность ПРОМ для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош} = 10^{-8}$ , считая, что основой ПУ является интегрирующий усилитель, в первом каскаде которого используется Si – ПТШ. Цифровой сигнал в форме NRZ – кода передается по ВОЛС со скоростью  $V = 10^7$  бит/с методом модуляции на длине волны  $\lambda = 0,95$  мкм. После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha = 0,1$ , а сквозная АЧХ ПРОМ имеет вид “приподнятого косинуса”. Светочувствительным элементом ПРОМ является

p-i-n диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.8$ , темновым током  $i_{т}=10$  нА и нагруженным на сопротивление  $R=1$  Мом. Оценить номиналы элементов ПШК, полагая, что емкость ФД и входного каскада ПУ равна 10 пФ.

3.8. Оценить чувствительность ПРОМ для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош} = 10^{-9}$ , считая, что основой ПУ является интегрирующий усилитель, в первом каскаде которого используется Si – ПТШ. Цифровой сигнал в форме NRZ – кода передается по ВОЛС со скоростью  $V = 10^8$  бит/с методом модуляции на длине волны  $\lambda=0.95$  мкм. После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha=0,1$ , а сквозная АЧХ ПРОМ имеет вид “приподнятого косинуса”. Светочувствительным элементом ПРОМ является p-i-n диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.9$ , темновым током  $i_{т}=15$  нА и нагруженным на сопротивление  $R=1$  мОм. Оценить номиналы элементов ПШК, полагая, что емкость ФД и входного каскада ПУ равна 15 пФ.

3.9. Предложить состав и схему размещения оборудования участка цифрового линейного тракта, построенного на основе аппаратуры одноволновой двухволоконной однокабельной ВОСП, предназначенной для передачи сигнала STM-16 в формате NRZ – кода на длине волны  $\lambda=1300$  нм, на расстояние 1000 км. Определить  $P_{min}$  ПРОМ, для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош} = 10^{-6}$ , считая, что используется Si – ПТШ и p-i-n диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0,8$ , темновым током  $i_{т} = 10$  нА и нагруженный на сопротивление  $R=1$  мОм, а волоконно-оптические усилители (репитеры) системы характеризуются коэффициентом инверсии населенностей, равным 1.5.

3.10. Предложить состав и схему размещения оборудования участка цифрового линейного тракта, построенного на основе аппаратуры одноволновой двухволоконной однокабельной ВОСП, предназначенной для передачи сигнала STM-4 в формате NRZ – кода на длине волны  $\lambda=1340$  нм, на расстояние 800 км.

Определить  $P_{min}$  ПРОМ, для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош}=10^{-7}$ , считая, что используется  $Si$  – ПТШ и лавинный фотодиод (ФД), работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.85$ , коэффициентом лавинного размножения  $M=10$ , темновым током  $i_{т}=10$  нА и нагруженный на сопротивление  $R=50$  кОм, а волоконно-оптические усилители (репитеры) системы характеризуются коэффициентом инверсии населенностей, равным 1.5.

3.11. Предложить состав и схему размещения оборудования участка цифрового линейного тракта, построенного на основе аппаратуры одноволновой двухволоконной однокабельной ВОСП, предназначенной для передачи сигнала STM-4 в формате NRZ – кода на длине волны  $\lambda=1300$  нм, на расстояние 700 км. Определить  $P_{min}$  ПРОМ, для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош}=10^{-8}$ , считая, что используется  $GaAs$  – ПТШ и лавинный фотодиод (ФД), работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.85$ , коэффициентом лавинного размножения  $M=20$ , темновым током  $i_{т}=5$  нА и нагруженный на сопротивление  $R=100$  кОм, а волоконно-оптические усилители (репитеры) системы характеризуются коэффициентом инверсии населенностей, равным 2.

3.12. Предложить состав и схему размещения оборудования участка цифрового линейного тракта, построенного на основе аппаратуры одноволновой двухволоконной однокабельной ВОСП, предназначенной для передачи сигнала STM-16 в формате NRZ – кода на длине волны  $\lambda=1340$  нм, на расстояние 1200 км. Определить  $P_{min}$  ПРОМ, для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош}=10^{-9}$ , считая, что используется  $GaAs$  – ПТШ и лавинный фотодиод (ФД), работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.85$ , коэффициентом лавинного размножения  $M=30$ , темновым током  $i_{т}=3$  нА и нагруженный на сопротивление  $R=10$  кОм, а волоконно-оптические усилители (репитеры) системы характеризуются коэффициентом инверсии населенностей, равным 2.

3.13. Оценить чувствительность ПРОМ для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош}=10^{-6}$ , считая, что основой ПУ является интегрирующий усилитель, в

первом каскаде которого используется *GaAs* – ПТШ. Цифровой сигнал в форме NRZ – кода передается по ВОЛС со скоростью  $V=10^7$  бит/с методом модуляции на длине волны  $\lambda=0.82$  мкм. После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha=0,1$ , а сквозная АЧХ ПРОМ имеет вид “приподнятого косинуса”. Светочувствительным элементом ПРОМ является лавинный фотодиод (ФД), работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.85$ , коэффициентом лавинного размножения  $M=30$ , темновым током  $i_{т}=3$  нА и нагруженный на сопротивление  $R=10$  кОм.. Оценить номиналы элементов ПШК, полагая, что емкость ФД и входного каскада ПУ равна 10 пФ.

3.14. Оценить чувствительность ПРОМ для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош}=10^{-7}$ , считая, что основой ПУ является интегрирующий усилитель, в первом каскаде которого используется *GaAs* – ПТШ. Цифровой сигнал в форме NRZ – кода передается по ВОЛС со скоростью  $V=10^8$  бит/с методом модуляции на длине волны  $\lambda=0.8$  мкм. После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha=0,1$ , а сквозная АЧХ ПРОМ имеет вид “приподнятого косинуса”. Светочувствительным элементом ПРОМ является лавинный фотодиод (ФД), работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.80$ , коэффициентом лавинного размножения  $M=10$ , темновым током  $i_{т}=3$  нА и нагруженный на сопротивление  $R=10$  кОм. Оценить номиналы элементов ПШК, полагая, что емкость ФД и входного каскада ПУ равна 20 пФ.

3.15. Оценить чувствительность ПРОМ для коэффициента битовых ошибок  $P_{ош}=10^{-8}$ , считая, что основой ПУ является интегрирующий усилитель, в первом каскаде которого используется *GaAs* – ПТШ. Цифровой сигнал в форме NRZ – кода передается по ВОЛС со скоростью  $V=10^8$  бит/с методом модуляции на длине волны  $\lambda=0,8$  мкм. После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha=0,1$ , а сквозная АЧХ ПРОМ имеет вид “приподнятого косинуса”. Светочувствительным элементом



ПРОМ является лавинный фотодиод (ФД), работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.85$ , коэффициентом лавинного размножения  $M=30$ , темновым током  $i_{\text{т}}=3$  нА и нагруженный на сопротивление  $R=10$  кОм.

3.16. Оценить чувствительность ПРОМ для коэффициента битовых ошибок  $P_{\text{ош}}=10^{-6}$ , считая, что основой ПУ является интегрирующий усилитель, в первом каскаде которого используется *GaAs* – ПТШ. Цифровой сигнал в форме NRZ – кода передается по ВОЛС со скоростью  $V=10^7$  бит/с методом модуляции на длине волны  $\lambda=0.85$  мкм. После преобразований в линии этот импульс на входе ПРОМ приобретает гауссову форму с параметром  $\alpha=0,1$ , а сквозная АЧХ ПРОМ имеет вид “приподнятого косинуса”. Светочувствительным элементом ПРОМ является лавинный фотодиод (ФД), работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.75$ , коэффициентом лавинного размножения  $M=20$ , темновым током  $i_{\text{т}}=5$  нА и нагруженный на сопротивление  $R=50$  кОм. Оценить номиналы элементов ПШК, полагая, что емкость ФД и входного каскада ПУ равна 15 пФ.

# 4 АНАЛОГОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

## 4.1 Основные теоретические сведения

Структурная схема аналоговой волоконно-оптической системы передачи (А – ВОСП) с модуляцией интенсивности (МИ):

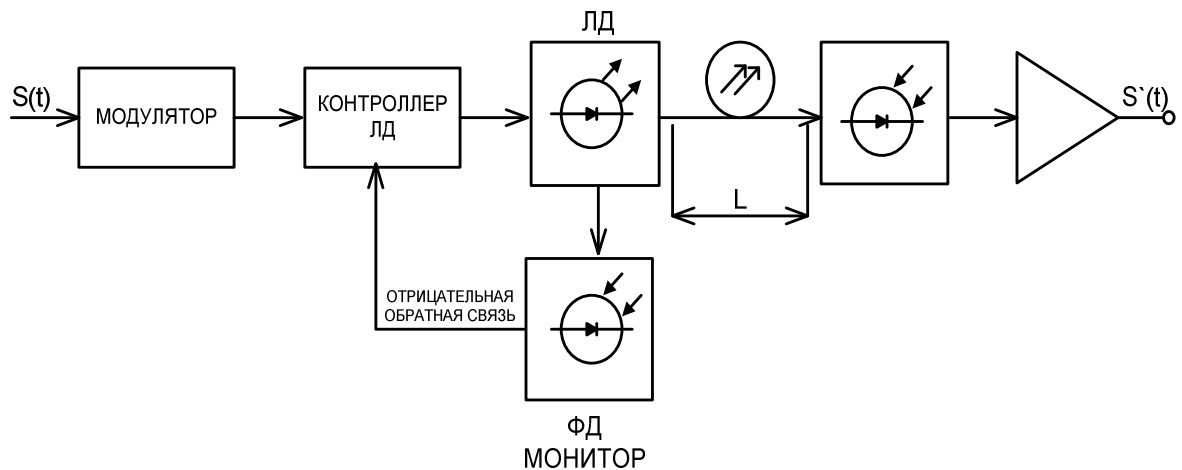


Рис. 4.1 - Структурная схема аналоговой волоконно-оптической системы передачи.

Важнейшими параметрами А–ВОСП являются:

- отношение средней мощности сигнала к среднему уровню шумов на выходе ФПУ.

$$\rho = P_0 / P_n \quad (4.1)$$

Мощности  $P_0$ ,  $P_n$  пропорциональны квадратам сигнального тока  $I_s$  ФД и среднеквадратического шумового тока  $I_n$ .

- Динамический диапазон:

$$D = 20 \lg(I_{Smax} / I_{Smin}) = 10 \lg(P_{max} / P_{min}), \quad (4.2)$$

где  $P_{max}$ ,  $P_{min}$  и  $I_{Smax}$ ,  $I_{Smin}$  – максимальный и минимальный уровни сигнала, обеспечивающие заданную величину  $\rho$ .

- При МИ гармоническим сигналом с частотой  $\Omega$  сигнальный ток  $I_s$  пропорционален глубине модуляции  $m$  и мощности (интенсивности)

оптического сигнала  $P(t)$ :

$$P(t) = P_0(1 + m \cos \Omega t),$$

так, что при  $m_{max}=1$  имеем:

$$D = 20 \lg(m_{max}/m_{min}) = 20 \lg(1/m_{min}). \quad (4.3)$$

• Мощность шумов  $P_n$ , как и в ЦВОСП, содержит составляющие тепловых шумов входной цепи и ПУ ПРОМ, дробовые шумы сигнального и темнового токов, а также собственные шумы лазера. Мощность оптического сигнала при его распространении в ОБ затухает и зависит от ее длины  $L$  как  $P(L) = P_0 \exp(-\alpha L)$ . С учетом этого зависимость параметра  $\rho$  от длины А-ВОСП описывается соотношением:

$$\rho(L, m) = \frac{\frac{1}{2} [m \cdot \mathfrak{R} \cdot M \cdot P_0 e^{-\alpha L}]^2}{RIN (\mathfrak{R} \cdot P_0 e^{-\alpha L})^2 \cdot \Delta f \cdot M^2 + P_{nf} + 2q \cdot (i_{tt} + \mathfrak{R} \cdot P_0 e^{-\alpha L}) \cdot M^2 \cdot F_\delta(M) \cdot \Delta f + \frac{4kt}{R} \cdot F_a \cdot \Delta f}, \quad (4.4)$$

где  $\mathfrak{R} = \frac{\eta q}{h\nu}$  - токовая чувствительность ФД;  $t$  - абсолютная температура;  $F_a$  - коэффициент шума ФПУ;  $R$  - сопротивление нагрузки ФД;  $i_{tt}$ ,  $\eta$ ,  $M$ ,  $F_\delta$  - темновой ток, квантовая эффективность, коэффициенты лавинного размножения и шума ФД соответственно;

$$F(M) \cong M^X; X = \begin{cases} 0.3 - Si; \\ 0.7 - InGaAs; \\ \approx 1 - Ge. \end{cases}$$

$RIN$  - (Relative Intensity Noise) относительная интенсивность шума, показатель определяющий среднюю мощность внутренних шумов интенсивности  $\Delta P$  ЛД:

$$RIN = \frac{\Delta P^2}{P_0^2 \cdot \Delta f}. \quad (4.5)$$

- Коэффициент  $RIN$  определяется несколькими факторами:
  - собственными флуктуациями интенсивности ЛД, характеризующиеся коэффициентом  $RIN_s$ ;
  - отражениями в ОБ, в результате которых часть мощности оптического сигнала возвращается обратно в резонатор ЛД, вызывая флуктуации излучения.

Данный фактор характеризуется коэффициентом  $RIN_R$ . Если отражения сигнала образуются только в концевых коннекторах ОБ длиной  $L$  коэффициент отражения равен  $R$ , а длина  $L$  удовлетворяет условию:  $\frac{\Delta\nu \cdot L}{c} \gg 1$ , то параметр

$RIN_R$  можно оценить по формуле:

$$RIN_R = \frac{4R^2}{\pi} \cdot \frac{\Delta\nu}{f_0^2 + \Delta\nu^2}. \quad (4.6)$$

- Шум модового распределения образуется в результате конкуренции мод в резонаторе ЛД. В одномодовом лазере этот вид шума, очевидно, полностью исключается.

Параметр  $P_{nf}$  в формуле (4.4) есть мощность шумов интенсивности ЛД, полученных в результате преобразования флуктуаций фазы оптического сигнала (фазовых шумов) за счет дисперсионных фазовых сдвигов в ОБ.

Главным физическим механизмом, определяющим спектральную ширину линии генерации одномодового полупроводникового лазера  $\Delta\nu$ , является процесс спонтанной эмиссии. Фотон, спонтанно эмитированный в лазерную моду, вызывает уширение линии, которое частично обусловлено случайной «фазой» фотона и частично сдвигом эмитированного излучения, вызываемого связью между мгновенным значением плотности носителей и коэффициентом преломления активной области лазерного резонатора. Поля, связанные со спонтанно эмитируемыми фотонами, суммируются некогерентно с лазерным полем. При этом возникают амплитудные и фазовые флуктуации, т.е. 2 взаимосвязанные разновидности шумов лазера. Спектральное распределение мощности фазового шума  $G(\nu)$  имеет вид:

$$G(\nu) = \frac{\Delta\nu}{\pi\nu^2} \quad \text{при } \nu \gg \Delta\nu,$$

где  $\Delta\nu$  есть полная ширина линии генерации, обусловленная шумами лазера.

Эта величина обратно пропорциональна мощности излучения лазера  $P_0$ . Из этого выражения следует, что ширина линии излучения зависит от мощности лазера. Чем выше превышен порог лазера, тем больше  $P_0$  и тем меньше  $\Delta\nu$ . Значение  $\Delta\nu$  для многомодового полупроводникового лазера, без специальных

устройств селекции и сужения линии, имеет ширину порядка  $\Delta\lambda \approx 1 - 5$  нм , а при одномодовом режиме генерации ширина спектральной линии не превышает значение 0,05 – 0,4 нм.

Фазовые шумы не вызывают флуктуаций фототока фотодиода, однако по мере распространения излучения ЛД вдоль ОВ происходит преобразование в фазовых флуктуаций в шум интенсивности. Это преобразование обусловлено дисперсией ОВ. Действительно, уровень дисперсии в ОВ определяются коэффициентом,

$$D = \frac{1}{L} \frac{\partial T}{\partial \lambda},$$

где  $T$  – время прохождения волной ОВ длиной  $L$ ,  $\lambda$  - длина волны. Так как,

$$T = \frac{L}{V_{gp}} = \frac{L}{\frac{d\omega}{d\beta}} = L \frac{d\beta}{d\omega}, \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{2\pi V}{\omega}, \quad \text{то} \quad \frac{\partial T}{\partial \lambda} = \frac{dT}{d\omega} \frac{d\omega}{d\lambda} = L \frac{d\omega}{d\lambda} \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$$

Учитывая далее, что  $\frac{d\omega}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} = -\frac{\omega}{\lambda}$  из последних формул получим

выражение для дисперсионного коэффициента  $D$ :

$$D = -\frac{\omega}{\lambda} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \cdot \left[ \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}} \right].$$

Таблица 4.1 - Стандартные значения  $D$  для SMF-ОВ с несмещенной дисперсией:  
пс./нм.км.)

$\lambda$ , мкм.	1.3	1.55
$D$ , пс./нм.км.)	3.5	18

Механизм преобразования шумов таков: за счет различий во времени прохождения фазового шума вдоль ОВ происходит изменение фазового спектра распределения  $G(\nu)$ , в результате чего создаются условия для интерференции компонент  $G(\nu)$ , т.е. преобразование фазового шума лазера в шум интенсивности. Для небольших длин  $L$  ОВ мощность этого шума  $P_{nf}$  можно оценить формулой:

$$P_{nf} = 0.5 \cdot 10^{-18} \cdot \Delta\nu[\Gamma\Gamma\mu] \cdot f_0^2[\Gamma\Gamma\mu] \cdot D^2 \cdot L^2[\text{км}] \cdot \Delta f^2 \cdot P_0, \quad (4.7)$$

где  $\Delta\nu$  – ширина линии излучения ЛД;  $f_0$  – несущая частота аналогового сигнала;  $D$  – дисперсионный коэффициент ОВ;  $\Delta f$  – рабочая полоса частот А – ВОСП.

В качестве примера на рис.4.2 приведены зависимость от длины ОВ мощности шумов интенсивности ЛД, образовавшихся в результате преобразования фазового шума, для двух значений коэффициента  $D$  при использовании ЛД с шириной излучения 300 ГГц (рис.4.2а) и 10 ГГц (рис. 4.2б).

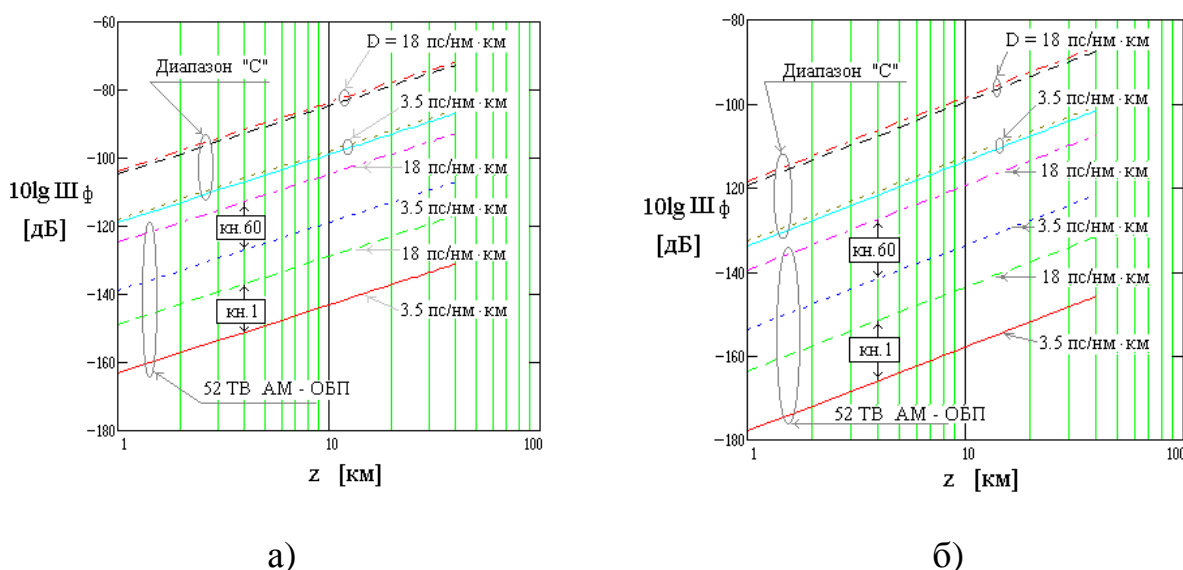


Рис. 4.2.

Кроме перечисленных шумов частотные флуктуации в лазере возникают также из-за флуктуаций температуры активного слоя, акустических возмущений длины резонатора и нестабильностей инжекционного тока. Последние нестабильности называются техническими шумами.

Формула (4.4) связывает между собой динамический диапазон  $D$  и отношение сигнал–шум  $\rho$  А-ВОСП. При заданной длине линии величина  $D$  рассчитывается по формуле (4.3), при этом  $m_{min}$  находится, например, графически, как точка пересечения зависимость  $\rho(L, m)$  с пороговым уровнем  $\rho_{пор}$  для заданной  $L$ .

При малой мощности сигнала наибольшую величину в знаменателе (4.4) имеет последнее слагаемое. Это значит, что в системе преобладают тепловые шумы входной цепи и ПУ ПРОМ. В этом случае зависимость  $\rho(L)$  в (4)

аппроксимируется прямой линией А (см. рис.4.3а). Как видим в данном режиме даже небольшое уменьшение длины  $L$  приводит к значительному расширению динамического диапазона системы.

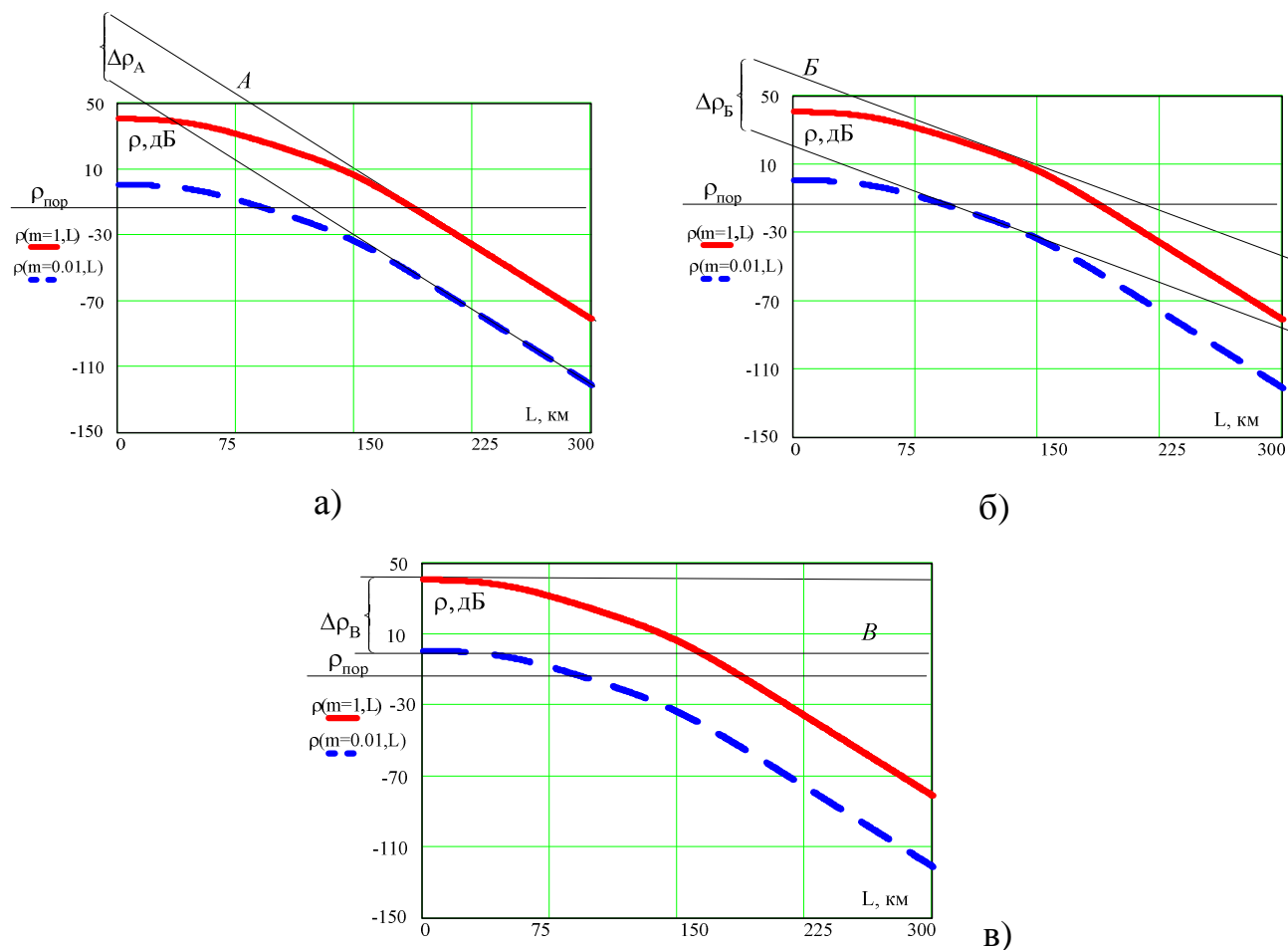


Рис.4.3.

При большей мощности сигнала  $P_0$  в системе преобладающим становится дробовой шум. В этом случае зависимость  $\rho(L)$  более слабая, она описывается линией  $B$  на рис.4.3б. Эффективность обмена параметров  $\rho$  и  $D$  здесь не столь значительна.

При дальнейшем повышении мощности сигнала  $P_0$  в системе основными становятся перечисленные выше компоненты шума лазерного диода. В этом режиме зависимость  $\rho$  от  $L$  вовсе исчезает (см. рис.4.3в), а динамический диапазон  $D$  достигает своей максимальной величины. Для его расширения здесь необходимо снижать  $RIN_s$ ,  $RIN_R$ , использовать узкополосный ЛД и снижать дисперсию в ОБ.

## 4.2 Примеры решения задач

### Задача № 4.1

Передача аналогового сигнала по ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией длиной  $L=90$  км. путем модуляции интенсивности на частоте  $f_0=2.5$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f=1000$  МГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является  $p-i-n$  диод, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.9$ , темновым током  $i_{ct}=2$  нА и нагруженным на сопротивление  $R=1$  МОм. Мощность оптического сигнала, генерируемого лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu =10$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1.15$  мкм. равна 10 дБм. Уровень шумов интенсивности ЛД определяется коэффициентом  $RIN=10^{-15}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 2. Определить динамический диапазон А-ВОСП при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=0$ дБ., если коэффициент отражения оптического сигнала на обоих концах ОВ равен 1 проценту. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится  $D$  если длину линии уменьшить вдвое?

### Решение

Подставим указанные параметры А-ВОСП в формулу (4.4) и учитывая, что для заданной длины волны стандартный уровень дисперсионного коэффициента ОВ равен  $D=18$ пс./ (нм.км.), получим следующий график зависимости  $\rho(m,L)$  (см. рис.4.4а):

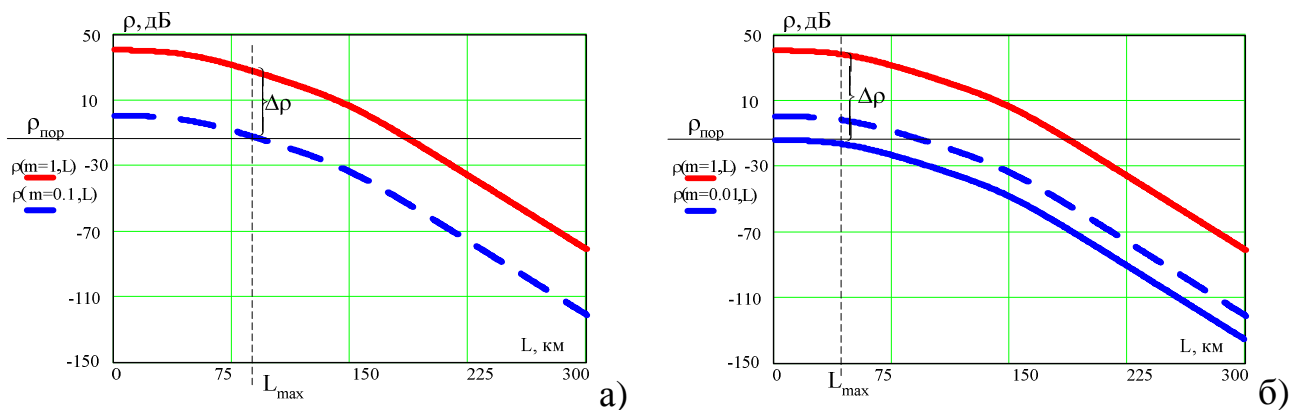


Рис.. 4.4



Из этого графика видно, что на заданном расстоянии  $L=90$  км пороговый уровень  $\rho_{nop}=0$ дБ достигается при глубине модуляции  $m_{min}=0.1$ . Следовательно, в соответствии с (3), динамический диапазон А-ВОСП будет равен:

$$D = 20\log(1/m_{min})=10\log(10)=20(\text{дБ}).$$

Из приведенного графика видно, что в области приблизительно от 75 до 150 км определяющими являются дробовые шумы сигнала. На меньших длинах линии  $L$  превалируют шумы лазера ( $RIN_s$ ), а на больших – тепловой шум входной цепи ПРОМ. Следовательно для заданной  $L$  характеристики системы определяются дробовыми шумами сигнала.

Если длину линии уменьшить вдвое, то пороговая линия пересечет график  $\rho(m,L)$  при  $m=0.01$  (см. рис.4.4б). Здесь определяющими являются шумы ЛД, главными из которых являются шумы связанные с отражениями оптического сигнала. Динамический диапазон в данном режиме достигнет своей максимальной величины 40 дБ и для дальнейшего его расширения необходимо, прежде всего, снижать отражения оптического сигнала в ОВ.

#### **Задача № 4.2**

Передача аналогового и цифрового сигналов осуществляется по идентичному ОВ - SMF с несмещенной дисперсией. Светочувствительным элементом ПРОМ в каждой из систем является InGaAs - ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.8$ , темновым током  $i_{it}=1$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M=1$  и нагруженным на сопротивление  $R=100$  КОм. Мощность оптического сигнала, генерируемого лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu=10$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1,15$  мкм равна 0 дБм. Уровень шумов интенсивности ЛД определяется коэффициентом  $RIN_s=4\cdot 10^{-15}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 2, а коэффициент отражения оптического сигнала на в концевых коннекторах ОВ равен 0,1 процента. Сравните максимальные длины  $L$  и динамический диапазон А-ВОСП и Ц-ВОСП если аналоговый сигнал передается путем модуляции интенсивности на частоте  $f_0=0.5$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f=100$

МГц в динамическом диапазоне 46 дБ с минимальным отношением сигнал/шум 10дБ., а цифровой – в той же полосе с максимально возможной скоростью и коэффициентом битовых ошибок  $10^{-9}$ . Считать, что для формирования цифрового сигнала используется 8- разрядный АЦП с А-законом компрессии. Какой вид шума является определяющим в работе обеих систем?

### Решение

Расчет динамического диапазона А-ВОСП аналогичен изложенному в предыдущей задаче. Графический способ его отыскания приведен на рис.4.5. В указанных условиях величина  $D=46$  дБ достигается при  $L \approx 10$  км. Видим, что при этом основными шумами системы являются шумы источника излучения.

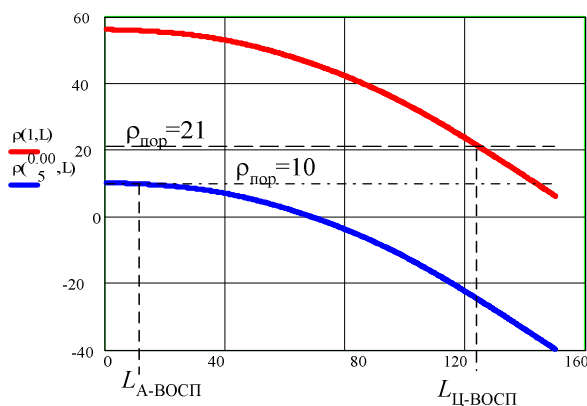


Рис. 4.5

Динамический диапазон цифрового сигнала с  $N$ -разрядной равномерной шкалой квантования равен:

$$D = 10 \cdot \lg \left[ \frac{2^N - 1}{P_{ш}} \right] = 10 \cdot \lg (12 \cdot 2^N).$$

Выигрыш в разрядности АЦП  $\Delta n$  при компандирования А-законом равен:

$$\Delta n = \frac{20}{6} \cdot \lg \left( \frac{A}{1 + \ln A} \right).$$

С учетом этого динамический диапазон компандированного сигнала будет:

$$D = 10 \cdot \lg (12 \cdot 2^{N+\Delta n}).$$

В рассматриваемом случае для  $A=87,6$  и  $N=8$  получим практически ту же величину  $D=46,8$  дБ.

Оценим длину Ц-ВОСП. Q-параметр помехоустойчивости системы для заданного коэффициента ошибок равен:  $Q \approx I_s/2\sigma=6$ . Откуда, учитывая, что в случае цифрового сигнала глубина модуляции  $m$  максимальна и равна 1, находим требуемое для работы Ц-ВОСП отношение  $\rho(m=1,L)$  равно 21 дБ.. Следовательно, искомая длина Ц-ВОСП находится как решение уравнения  $\rho(1,L)=21$ . Графическое решение этого уравнения, приведение на рис.4.5, дает  $L>120$  км. Как видим, в приемнике Ц-ВОСП превалируют тепловые шумы.

### 4.3 Задачи для самостоятельного решения

4.1 Передача сигнала в А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией путем модуляции интенсивности света на частоте  $f_0=0.5$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f=50$  МГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является *Ge* ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.9$ , темновым током  $i_{tt}=2$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M=20$  и нагруженным на сопротивление  $R=1$  МОм. Оптический сигнал мощностью 10 дБм. генерируется лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu =10$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1.3$  мкм. Уровень  $RIN_s=10^{-15}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.5. Определить максимальную длину линии связи  $L$ , обеспечивающую динамический диапазон А-ВОСП 30дБ. при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=10$ дБ., если отражения оптического сигнала сосредоточены лишь в концевых коннекторах ОВ и коэффициент отражения не превышает равен 0.1 процента. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится  $D$  если длину линии увеличить вдвое?

4.2 Передача аналогового сигнала по ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией длиной  $L=10$  км. Способом МИ на поднесущей частоте  $f_0=1.5$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f=250$  МГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является *InGaAs-ЛФД*, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.85$ , темновым током  $i_{tt}=5$  нА,

коэффициентом лавинного размножения  $M=25$  и нагруженным на сопротивление  $R=300 \text{ КОм}$ . Мощность оптического сигнала, генерируемого лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu = 300 \text{ ГГц}$ . на длине волны  $\lambda=1.15 \text{ мкм}$ . равна  $0 \text{ дБм}$ . Уровень  $RIN_s=10^{-12}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен  $1.2$ . Определить динамический диапазон А-ВОСП при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=5\text{дБ}$ ., предполагая, что отражения оптического сигнала сосредоточены лишь в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает  $0.1$  процента. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится  $D$  если длину линии уменьшить вдвое?

4.3 Передача аналогового сигнала по А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией длиной  $L=10 \text{ км}$ . Способом МИ на поднесущей частоте  $f_0=1.5 \text{ ГГц}$ . в полосе частот  $\Delta f=250 \text{ МГц}$ . Светочувствительным элементом ПРОМ является InGaAs-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.85$ , темновым током  $i_{tt}=5 \text{ нА}$ , коэффициентом лавинного размножения  $M=25$  и нагруженным на сопротивление  $R=300 \text{ КОм}$ . Мощность оптического сигнала, генерируемого лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu = 300 \text{ ГГц}$ . на длине волны  $\lambda=1.15 \text{ мкм}$ . равна  $0 \text{ дБм}$ . Уровень  $RIN_s=10^{-12}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен  $1.2$ . Определить динамический диапазон А-ВОСП при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=5\text{дБ}$ ., предполагая, что отражения оптического сигнала сосредоточены лишь в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает  $0.1$  процента. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится длина линии, если по ней в той же полосе частот передавать цифровой сигнал с максимально возможной скоростью и коэффициентом битовых ошибок  $10^{-9}$ ?

4.4 Передача аналогового сигнала по А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией длиной  $L=10 \text{ км}$ . Способом МИ на поднесущей

частоте  $f_0=1.0$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f=150$  МГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является InGaAs-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.85$ , темновым током  $i_{tt}=15$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M=25$  и нагруженным на сопротивление  $R=300$  КОм. Мощность оптического сигнала, генерируемого лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu =300$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1.3$  мкм. равна 0 дБм. Уровень  $RIN_s=10^{-12}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.2. Определить динамический диапазон А-ВОСП при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=5$ дБ., предполагая, что отражения оптического сигнала сосредоточены лишь в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает 0.5 процента. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится длина линии если ЛФД в ПРОМ заменить  $p-i-n$  диодом, работающим с той же квантовой эффективностью?

4.5 Передача аналогового сигнала по А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией длиной  $L=10$  км. способом МИ на поднесущей частоте  $f_0=1.0$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f=150$  МГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является InGaAs-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.85$ , темновым током  $i_{tt}=15$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M=25$  и нагруженным на сопротивление  $R=300$  КОм. Мощность оптического сигнала, генерируемого лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu =300$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1.3$  мкм. равна 0 дБм. Уровень  $RIN_s=10^{-12}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.2. Определить динамический диапазон А-ВОСП при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=5$ дБ., предполагая, что отражения оптического сигнала сосредоточены лишь в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает 0.5 процента. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится длина линии если ЛФД в ПРОМ заменить  $p-i-n$  диодом, работающим с той же квантовой эффективностью?

4.6 Передача сигнала в А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией путем МИ на частоте  $f_0=1.5$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f=700$  МГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является Si-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.7$ , темновым током  $i_{tt}=5$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M=25$  и нагруженным на сопротивление  $R=0.2$  МОм. Оптический сигнал мощностью 10 дБм. генерируется лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu =300$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1.15$  мкм. Уровень  $RIN_s=10^{-16}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.8. Определить максимальную длину линии связи  $L$ , обеспечивающую динамический диапазон А-ВОСП 50дБ. при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=15$ дБ., если отражения оптического сигнала сосредоточены лишь в концевых коннекторах ОВ и коэффициент отражения не превышает равен 0.01 процента. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится длина линии, если ЛФД в ПРОМ заменить  $p-i-n$  диодом, работающим с той же квантовой эффективностью?

4.7 Передача сигнала в А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией путем МИ на частоте  $f_0=5$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f=2000$  МГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является Si-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.9$ , темновым током  $i_{tt}=0.5$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M=35$  и нагруженным на сопротивление  $R=0.1$  МОм. Оптический сигнал мощностью 0 дБм. генерируется лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu =100$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1.3$  мкм. Уровень  $RIN_s=10^{-15}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.9. Определить максимальную длину линии связи  $L$ , обеспечивающую динамический диапазон А-ВОСП 45дБ. при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=10$ дБ., если отражения оптического сигнала сосредоточены лишь в концевых коннекторах ОВ и коэффициент отражения не превышает равен 0.01 процента.

Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится  $D$  если длину линии уменьшить вдвое?

4.8 Передача аналогового сигнала по А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией длиной  $L=40$  км. способом МИ на поднесущей частоте  $f_0=1.0$  ГГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является InGaAs-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.85$ , темновым током  $i_{\text{т}}=15$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M=25$  и нагруженным на сопротивление  $R=300$  КОм. Мощность оптического сигнала, генерируемого лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu=300$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1.3$  мкм. равна 0 дБм. Уровень  $RIN_s=10^{-12}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.2. Отражения оптического сигнала сосредоточены только в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает 0.1 процента. Определить рабочую полосу частот  $\Delta f$  системы из условия обеспечения динамического диапазона  $D=50$ дБ., при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=10$ дБ. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится длина линии если ЛФД в ПРОМ заменить  $p-i-n$  диодом, работающим с той же квантовой эффективностью?

4.9 Передача сигнала в А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией длиной  $L=50$  км. способом МИ на поднесущей частоте  $f_0=5$  ГГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является Si-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.9$ , темновым током  $i_{\text{т}}=0.5$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M=35$  и нагруженным на сопротивление  $R=0.1$  МОм. Оптический сигнал мощностью 0 дБм. генерируется лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu=100$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1.3$  мкм. Уровень  $RIN_s=10^{-15}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.9. Отражения оптического сигнала сосредоточены только в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает 0.01 процента. Оценить полосу частот  $\Delta f$

системы, если ее динамический диапазон  $D=50$ дБ., а минимально допустимый уровень отношения сигнал/шум равен  $\rho=5$ дБ. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится  $D$  если длину линии уменьшить вдвое?

4.10 Передача сигнала в А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией путем МИ на частоте  $f_0=5$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f=2000$  МГц. Динамический диапазон А-ВОСП составляет 55дБ. при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=10$ дБ. Светочувствительным элементом ПРОМ является Si-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.9$ , темновым током  $i_{tt}=0.5$  нА. и нагруженный на сопротивление  $R=50$  кОм. Оптический сигнал мощностью 0 дБм. генерируется лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu=300$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1.15$  мкм. Уровень  $RIN_s=10^{-14}$ . Отражения оптического сигнала сосредоточены только в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает 0.05 процента. Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.5. Определить коэффициент лавинного размножения  $M$ , обеспечивающий максимальную длину линии связи  $L$ , обеспечивающую Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится  $D$  если длину линии уменьшить вдвое?

4.11 Передача сигнала в А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией путем МИ на частоте  $f_0=1.5$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f=250$  МГц. Динамический диапазон А-ВОСП составляет 55дБ. при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho=5$ дБ. Светочувствительным элементом ПРОМ является InGaAs-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta=0.9$ , темновым током  $i_{tt}=2.5$  нА. и нагруженный на сопротивление  $R=150$  кОм. Оптический сигнал мощностью 10 дБм. генерируется лазерным источником с шириной



линии излучения  $\Delta\nu = 300$  ГГц. на длине волны  $\lambda = 1.3$  мкм. Уровень  $RIN_s = 10^{-15}$ . Отражения оптического сигнала сосредоточены только в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает 0.15 процента. Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 2. Определить коэффициент лавинного размножения  $M$ , обеспечивающий максимальную длину линии связи  $L$ . Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится  $D$  если длину линии увеличить вдвое?

4.12 Передача сигнала в А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией путем МИ на частоте  $f_0 = 5$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f = 1250$  МГц. Динамический диапазон А-ВОСП составляет 55дБ. при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho = 10$ дБ. Светочувствительным элементом ПРОМ является *InGaAs*-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0.9$ , темновым током  $i_{tt} = 0.5$  нА. и нагруженный на сопротивление  $R = 250$  кОм. Оптический сигнал мощностью 10 дБм. генерируется лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu = 300$  ГГц. на длине волны  $\lambda = 1.3$  мкм. Уровень  $RIN_s = 10^{-15}$ . Отражения оптического сигнала сосредоточены только в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает 0.15 процента. Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 2. Определить коэффициент лавинного размножения  $M$ , обеспечивающий максимальную длину линии связи  $L$ . Как изменится длина линии, если по ней в той же полосе частот передавать цифровой сигнал с максимально возможной скоростью и коэффициентом битовых ошибок  $10^{-9}$ ?

4.13 Передача сигнала в А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией путем МИ на частоте  $f_0 = 5$  ГГц. в полосе частот  $\Delta f = 2000$  МГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является *Si*-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0.9$ , темновым током  $i_{tt} = 0.5$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M = 35$  и нагруженным на сопротивление  $R = 0.1$  МОм. Оптический сигнал мощностью 0

дБм. генерируется лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu = 100$  ГГц. на длине волны  $\lambda = 1.3$  мкм. Уровень  $RIN_s = 10^{-15}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.9. Определить максимальную длину линии связи  $L$ , обеспечивающую динамический диапазон А-ВОСП 45дБ. при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho = 10$ дБ., если отражения оптического сигнала сосредоточены лишь в концевых коннекторах ОВ и коэффициент отражения не превышает равен 0.01 процента. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится  $D$  если длину линии уменьшить вдвое?

4.14 Передача аналогового сигнала по А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией длиной  $L = 40$  км. способом МИ на поднесущей частоте  $f_0 = 1.0$  ГГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является InGaAs-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0.85$ , темновым током  $i_{тн} = 15$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M = 25$  и нагруженным на сопротивление  $R = 300$  КОм. Мощность оптического сигнала, генерируемого лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu = 300$  ГГц. на длине волны  $\lambda = 1.3$  мкм. равна 0 дБм. Уровень  $RIN_s = 10^{-12}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.2. Отражения оптического сигнала сосредоточены только в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает 0.1 процента. Определить рабочую полосу частот  $\Delta f$  системы из условия обеспечения динамического диапазона  $D = 50$ дБ., при минимально допустимом уровне отношения сигнал/шум равном  $\rho = 10$ дБ. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится длина линии если ЛФД в ПРОМ заменить  $p-i-n$  диодом, работающим с той же квантовой эффективностью?

4.15 Передача сигнала в А-ВОСП осуществляется по SMF-ОВ с несмещенной дисперсией длиной  $L = 50$  км. способом МИ на поднесущей частоте  $f_0 = 5$  ГГц. Светочувствительным элементом ПРОМ является Si-ЛФД, работающий при комнатной температуре с квантовой эффективностью  $\eta = 0.9$ ,

темновым током  $i_{tt}=0.5$  нА, коэффициентом лавинного размножения  $M=35$  и нагруженным на сопротивление  $R=0.1$  МОм. Оптический сигнал мощностью 0 дБм. генерируется лазерным источником с шириной линии излучения  $\Delta\nu = 100$  ГГц. на длине волны  $\lambda=1.3$  мкм. Уровень  $RIN_s=10^{-15}$ . Коэффициент шума предварительного усилителя А-ВОСП равен 1.9. Отражения оптического сигнала сосредоточены только в концевых коннекторах ОВ, а соответствующий коэффициент отражения не превышает 0.01 процента. Оценить полосу частот  $\Delta f$  системы, если ее динамический диапазон  $D=50$ дБ., а минимально допустимый уровень отношения сигнал/шум равен  $\rho=5$ дБ. Какой вид шума является определяющим в системе? Как изменится  $D$  если длину линии уменьшить вдвое?

## Список литературы

1. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов/ В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов . Под ред. Профессора ; под ред В. Н. Гордиенко. – М: Горячая линия – Телеком.2011. – 368 с.
2. Алексеев Е.Б., Гордиенко В.Н. и др. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. - Горячая линия-Телеком , 2008. -392 с
3. О.К. Скляр В. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие. – СПб.: Изд. «Лань», 2010. – 272 с.
4. Э.Л. Портнов. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи. Учебное пособие для вузов. – М.: Изд. «Горячая линия - Телеком», 2009. - 544 с.
5. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов/ В.В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко и др. Ред. В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалева. – М.: Горячая линия, 2004. – 510 с.
6. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов/ В.И. Иванов, В.Н. Гордиенко, Г.Н. Попов и др. Ред. В.И. Иванова. – М.: Горячая линия, 2005. - 232 с.
7. Р. Фриман. Волоконно-оптические системы связи. 3-е дополненное издание. – М.: Техносфера, 2006. – 496 с.
8. РД 45.195-2001 Применение транспортных технологий связи, использующих в качестве среды передачи оптическое волокно.
9. РД 45.286-2002 Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования.
10. Рекомендация МСЭ-Т М.2101 Нормы на качественные характеристики трактов и секций мультиплексирования СЦИ при вводе в эксплуатацию и в процессе эксплуатации.
11. Рекомендация МСЭ-Т G.828 Нормы на параметры ошибок международных трактов СЦИ постоянной скорости.

12. Рекомендация МСЭ-Т G.829 Параметры ошибок мультиплексных и регенерационных секций СЦИ.
13. Рекомендация МСЭ-Т G.957 (06/99) Оптические стыки для аппаратуры и систем передачи синхронной цифровой иерархии.
14. Рекомендация МСЭ-Т G.691 (10/2000) Оптические стыки для аппаратуры и систем передачи синхронной цифровой иерархии с оптическими усилителями.
15. Рекомендация МСЭ-Т G.692 (10/1998) Оптические интерфейсы многоканальных систем с оптическими усилителями.

## Список основных сокращений и обозначений

ЦСП – цифровая система передачи

ВОСП - цифровая волоконно-оптическая система передачи

ЦВОСП - волоконно-оптическая система передачи

А–ВОСП - аналоговая волоконно-оптическая система передачи

ОВ – оптическое волокно

МИ - модуляция интенсивности

АИМ - амплитудно-импульсная модуляция

ИКМ - импульсно-кодовая модуляция

ФНЧ - фильтр нижних частот

ИЭТ - источник эталонных токов

РЛ - линейный регенератор

ВОУ - волоконно-оптический усилитель

ПОМ - передающий оптический модуль

ПРОМ - приемный оптический модуль

ФПУ – фотоприемное устройство

ТИУ - трансимпедансный усилитель

ИУ - интегрирующий усилитель

ПШК – противозумовой корректор

RIN - относительная интенсивность шума

DSF - оптическое волокно со смещенной дисперсией

NDSF – оптическое волокно с несмещенной дисперсией

NZ-DSF – оптическое волокно с ненулевой смещенной дисперсией

**Учебное издание**

**Коханенко** Андрей Павлович

**Шарангович** Сергей Николаевич

**ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям  
по дисциплине «Оптические цифровые телекоммуникационные системы» для  
студентов специальности 210401 – Физика и техника оптической связи

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж 30 экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете  
систем управления и радиоэлектроники.  
634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.