**Некоммерческое акционерное общество**

**АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ**

**Кафеда Телекоммуникационных сетей систем**

# МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

**Конспект лекций**
**для студентов специальности 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации**

Алматы 2019

СОСТАВИТЕЛИ: Байкенов А.С., Темырканова Э.К., Киргизбаева А.У. Многоканальные телекоммуникационные системы. Конспекту лекций для студентов специальности 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации. – Алматы: АУЭС, 2019. – 64с.

Изложены конспекты двенадцати лекций по дисциплине «Многоканальные телекоммуникационные системы». В них представлены основы построения современных многоканальных сетей связи и методы их описания. Также приведены особенности мультиплексирования в современных транспортных платформах.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся в бакалавриате по специальности 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Ил. 49, табл. 5, библиогр. – 19 назв.

Рецензент

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2019 г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2019 г.

## Введение

Целью изучения дисциплины «Многоканальные телекоммуникационные системы» (МТС) является овладение знанием основных принципов построения транспортных сетей, реализованных на основе цифровых систем передачи (кабельных оптических, радио); овладение студентами сущности явлений, происходящих при передачи информации, принципов действия технических устройств, аппаратуры и технологий PDH, SDH, WDM, CWDM, DWDM, NGSDH, MPLS; умение правильно рассчитывать, анализировать и решать проблемы, относящиеся к многоканальной цифровой передаче информации, навыков эксплуатации МТС.

Дисциплина «Многоканальные телекоммуникационные системы» является базовым теоретическим курсом для студентов вузов связи. МТС – это средство переноса информации электронными средствами или это сеть «электромагнитных проводных и радиодорог». Эта дисциплина является основой для современных транспортных сетей связи.

В лекциях рассмотрены принципы построения современных многоканальных сетей связи, методы их описания, цифровые методы передачи информации.

Учебным планом для данной дисциплины отводится 5 кредитов, всего – 150 часов, из них для аудиторных занятий – 60 часа, для самостоятельной работы – 90 часов.

| Кредиты | Курс | Семестр | Лекции | Практические | Лаб.раб. | Курс.проект | Экзамен |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 4 | 7 | 15 | 15 | 30 | 7 | 7 |

## Лекция №1. Основные понятия и определения

*Цель лекции: ознакомиться с основными определениями и типовыми каналами.*

***Сигнал*** является переносчиком информации. Электрический сигнал служит переносчиком сообщения в системах телекоммуникации. Выбор электрических сигналов для переноса сообщения на расстояние объясняется тем, что скорость их распространения соизмерима со скоростью света.

Электрические сигналы могут быть непрерывными и дискретными.

Непрерывный сигнал с течением времени может принимать любые, в заданных пределах, мгновенные значения. Непрерывный сигнал называют аналоговым.

Дискретный сигнал характеризуется конечным числом значений информационного параметра.

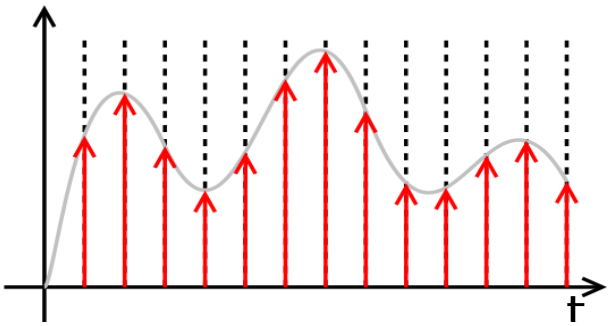



Рисунок 1.1 - Виды сигналов

На практике дискретные сообщения преобразуется в цифровой сигнал, когда последовательность отдельных значений (отсчетов) заменяется последовательностью символов 0 и 1 (двоичный код). Такой сигнал получил название цифрового.

***Основные понятия и определения.*** В многоканальной электросвязи сигналы любого вида передаются по отдельным каналам, которые организуют ся с помощью систем передачи СП.

***Система передачи СП*** - это совокупность технических средств, обеспечивающая образование линейного тракта, типовых групповых трактов и типовых каналов передачи первичной сети ВСС. Система передачи состоит из станционного оборудования и оборудования линейного тракта

Классификация СП

*По способу разделения каналов*: С частотным разделением каналов ЧРК.

*С временным разделением каналов ВРК.*

*По виду передаваемого сигнала*: Аналоговые системы передачи АСП. Цифровые системы передачи ЦСП.

*В зависимости от среды распространения*: воздушные, кабельные, *волоконно-оптические, радиорелейные*

*По назначению*: магистральные, внутризоновые, местные.

***Типовые каналы передачи***

Сигналы электросвязи передаются по каналам электросвязи различного назначения. Каналу электросвязи присваивают названия в зависимости от вида сети связи, например: *телефонный канал* (связи), *телеграфный канал* (связи), *канал передачи (данных)*.

В соответствии с определением ЕАСС и ЕСЭ РФ каналы связи и сетевые тракты должны быть стандартизованы по всем параметрам, т.е. они должны быть типовыми.

*Типовой канал передачи* — канал передачи, параметры которого соответствуют нормам ЕСЭ РФ.

*Канал передачи* — комплекс технических средств и среды распространения, обеспечивающий передачу сигналов электросвязи в полосе частот или со скоростью передачи, характерных для данного канала передачи между сетевыми станциями, сетевыми уздами или между сетевой станцией и сетевым узлом, а также между сетевой станцией или сетевым узлом и оконечным устройством первичной сети. Каналу передачи присваивают название *аналоговый* или *цифровой,* в зависимости от методов передачи сигналов электросвязи. Каналу передачи, в котором на разных его участках используют аналоговые или цифровые методы передачи сигналов электросвязи, присваивают название *смешанный канал передачи.* Канал передачи, не имеющий транзитов в полосе частот или со скоростью передачи сигналов данного канала, называется *простым каналом передачи.* Канал передачи с транзитами в полосе частот или со скоростью передачи данного канала называют *составными каналами передачи*.

*Транзитом каналов передачи* называют соединение одноименных каналов передачи, обеспечивающее прохождение сигналов электросвязи без изменения полосы частот или скорости передачи.

*Канал тональной частоты* (канал ТЧ) — типовой аналоговый канал передачи с полосой частот от 300 до 3 400 Гц.

*Широкополосный канал* — типовой канал передачи, формируемый на базе аналогового сетевого тракта при помощи аппаратуры формирования, включенной на его входе и выходе. Широкополосному каналу присваивают название в зависимости от сетевого тракта, на базе которого он образован, например:

- первичный широкополосный канал с эффективной полосой пропускания 65.. .103 кГц;
- вторичный широкополосный канал с эффективной полосой пропускания 330.530;
- третичный широкополосный канал с эффективной полосой пропускания 900.1 900 кГц и др.

Широкополосные каналы строятся на основе типового преобразовательного оборудования первичных, вторичных и третичных групп, занимающих полосы частот 60.108, 312.552 и 812.2 044 кГц.

Каналы звукового вещания строятся путем объединения 2, 3 и 4 каналов ТЧ.

Цифровому каналу в зависимости от скорости передачи сигналов электросвязи присваивают название:

- основной цифровой канал со скоростью передачи 64 кбит/с;
- первичный цифровой канал (тракт) со скоростью передачи 2 048 кбит/с;
- вторичный цифровой канал (тракт) со скоростью передачи 8 448 кбит/с;
- третичный цифровой канал (тракт) со скоростью передачи 34 368 кбит/с;
- четверичный цифровой канал (тракт) со скоростью передачи 139264 кбит/с.

Таблица 1.1 - Классификация типовых каналов передачи

| | |
|---|---|
| Канал тональной частоты (телефонный канал) | - эффективно передаваемая полоса частот (03,-3,4)кГц<br>- скорость передачи 64 кБит/сек |
| Телеграфный канал | Спектр частот (10 – 150) Гц |
| Канал звукового вещания | Спектр частот (30-15000) Гц |
| Канал передачи данных | Первичный (60-108) кГц или 2048 Кбит/с Вторичный (312-552) кГц или 8448 Кбит/с Третичный (812-2044) кГц или 34368 Кбит/с |
| Канал телевидения | Спектр частот (0 – 6) Мгц |

***Линейный тракт ЛТ*** - совокупность технических средств, обеспечивающая передачу сигналов электросвязи или в полосе частот, или со скоростью передачи, определяемой номинальным числом каналов данной системы передачи. Линейный тракт состоит из оконечной аппаратуры линейного тракта ОАЛТ, аппаратуры усилительных пунктов (НУП, НРП, ОУП, ОРП) и среды распространения (транспортной среды).

В зависимости от среды распространения линейный тракт может быть кабельным, воздушным, радиорелейным, спутниковым, волоконно-оптическим.

***Групповой тракт***– совокупность технических средств, обеспечивающая передачу сигналов электросвязи или в полосе частот, или со скоростью передачи нормализованной группы каналов ТЧ в пределах одной или нескольких систем передачи.

Средства телекоммуникаций обеспечивают организацию связи между абонентами любых населенных пунктов. Для этого создана внутриувязанная сеть связи (ВСС).

***ВСС***– это совокупность технических средств электросвязи, образующая первичную сеть типовых каналов передачи и типовых групповых трактов, и построенные на ее базе вторичные сети.

Первичная сеть состоит из совокупности станций и линий передачи, образующих сеть типовых каналов.

Первичная сеть охватывает территорию всей страны и имеет трехступенчатую структуру, объединяя магистральную, внутризоновые и местные сети.

Магистральная сеть располагается на территории всей страны и связывает между собой крупные населенные пункты.

Внутризоновая сеть располагается на территории области, края.

Местная сеть создается на территории города или сельского района и называется соответственно ГТС или СТС.

На базе каналов первичной сети создаются вторичные сети. В зависимости от вида электросвязи вторичные сети получили названия: телефонной, телеграфной, сети передачи данных, передачи газет, звукового вещания, телевизионного вещания.

На магистральных сетях используются системы передачи с большим числом каналов К-60П, ИКМ-1920, ИКМ-480.

На внутризоновых сетях - ИКМ-120, ИКМ-480,ИКМ -120У,

На городских сетях – ИКМ-120-4/5, ИКМ-30, ИКМ-30-4,АКУ-30.

На сельских сетях – ИКМ-30С,ИКМ-30.

В настоящее время на базе технологий SDH созданы транспортные сети, способные передавать огромные потоки информации по оптоволоконным линиям связи.

## Лекция№ 2. Основные параметры и характеристики каналов

*Цель лекции: ознакомиться со* схемой междугороднего канала, основными параметрами, *дифсистемы*.

### *Основные параметры и характеристики международного канала*

На городском участке сети сигналы между абонентами передаются по двухпроводной сети.

Междугородний канал должен быть 4-х проводным (рисунок 2.1).

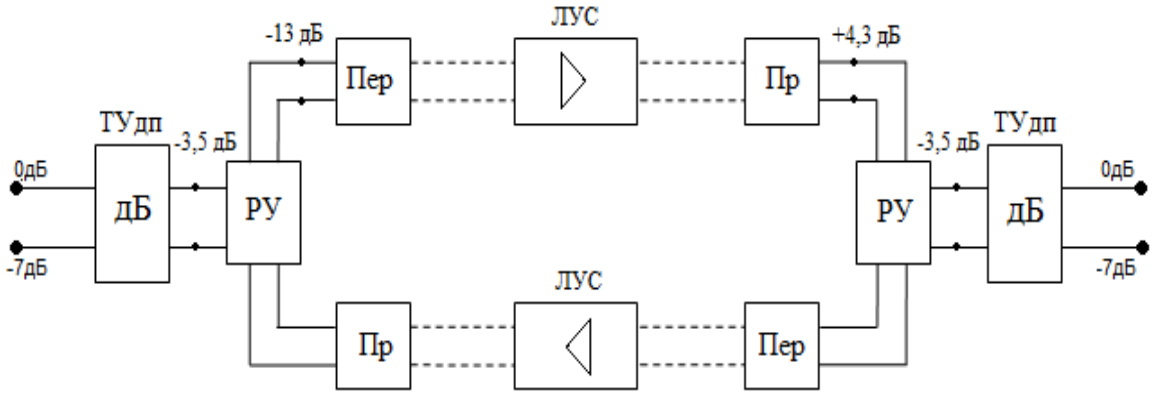



Рисунок 2.1 - Схема междугороднего канала ТЧ

$ТУ_{дп}$. – транзитный усилитель $a_{ту} = 3{,}5$ дБ)

РУ - развязывающее устройство

Пер – передатчик, преобразует исходный сигнал в линейный спектр

ЛУС – линейный усилитель, компенсирует затухание

***Дифференциальная система***

В качестве развязывающего устройства применяется дифференциальная система (ДС) (рисунок 2.2).

ДС должна пропускать сигнал от телефонного аппарата абонента в тракт передачи междугородного канала, из тракта приема междугородного канала к телефонному аппарату абонента, и не должна пропускать сигнал из тракта приема в тракт передачи канала.

Схема ДС содержит дифференциальный трансформатор с выделенной средней точкой и балансный контур, который устанавливается для уравновешивания ДС.

Затухание в направлении 1-2 и 4-1, называемыми направлением основной передачи, должно быть равно нулю. Затухание в направлении 4-2, называемым направлением обратной связи, должно быть равно бесконечности. Это достигается тем, что сигнал, поступающий в тракт приема, в дифференциальном трансформаторе делится на равные части, направленные в противоположные стороны. Поэтому магнитные потоки, которые создаются этими токами в сердечнике трансформатора, равны по величине, но направлены в противоположные стороны, поэтому взаимно компенсируются и не наводят ЭДС во вторичной обмотке трансформатора. Для обеспечения равенства токов в полуобмотках трансформатора сопротивление балансного контура, включенного в точки 3-3, должно быть равно сопротивлению линии, подключаемой к точкам 1-1.

Для определения величины затухания ДС в направлении основной передачи воспользуемся формулой

$$a_{4\text{-}1} = 10\lg\frac{P_{4-4}}{P_{1-1}} = 10\lg\frac{P_{4-4}}{P_{4-4}/2} = 10\lg 2 = 10\cdot 0.3 = 3 \text{ дБ}$$

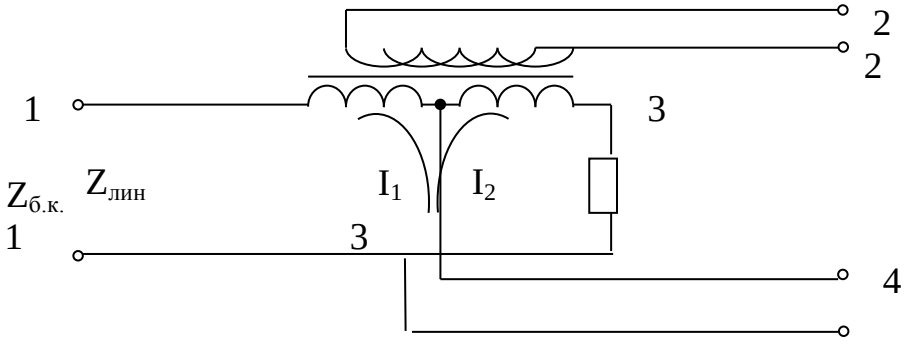



Рисунок 2.2 - Принципиальная схема ДС

Величина затухания в направлении обратной связи определим по формуле :

$$a_{4\text{-}2} = 20\lg\left[\frac{Z_{б.к} + Z_{лин}}{Z_{б.к} - Z_{лин}}\right] = \infty$$

при выполнении условия $Z_{б.к.} = Z_{лин}$

Поскольку в реальных условиях невозможно обеспечить равенство этих сопротивлений, то затухание ДС в направлениях основной передачи составляет (4-6) дБ, а в направлении обратной связи (40-60)дБ.

***Логарифмические единицы передачи***

1. Уровень передачи – это отношение фактического значения мощности сигнала в данной точке к соответствующему значению мощности сигнала в точке, принятой за исходную.

$$L = 10\log\frac{P_x}{P_0} \text{ (дБ)}$$

$$L = 10\ln\frac{P_x}{P_0} \quad \text{(Нп)}$$

2. Динамический диапазон сигнала – это разница между максимальным и минимальным уровнем сигнала

$$D_c = 10\lg\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = L_{\max} - L_{\min}$$

Для речевых сигналов $D_c = (35 \div 40)$ дБ

3. Пик-фактор

$$Q = 10\lg\frac{P_{\max}}{P_{ср}} \; Q_{сигн} = 14 \text{ дБ}$$

4. Помехозащищенность – это разница между минимальным уровнем сигнала и уровнем помехи.

$$A_з = 10\lg\frac{P_{\min}}{P_{помех}}$$

5. Остаточное затухание канала – это затухание, которое осталось не скомпенсированным усилением всех усилителей.

$$a_{ост} = \sum a_i - \sum S_i$$

Для нормальной работы канала остаточное затухание канала должно быть равно 7дБ.

## Лекция №3. Принципы построения систем передачи

*Цель лекции: Рассматриваются* принципы построения систем передачи, схемы МСП с частотным разделением каналов и временным разделением каналов, виды импульсной модуляции сигналов, выбор частоты дискретизации.

### *Классификация систем передачи, использующих единый ресурс*

Любой сигнал занимает определенную полосу частот, существует некоторое время, обладает ограниченной энергией и распространяется в определенной области пространства. В соответствии с этим выделяют четыре вида ресурса канала: частотный, временной, энергетический и пространственный.

Проблема *эффективного* использования ресурса общего канала обострилась из-за необходимости обеспечения связи в условиях неравномерности и непредсказуемости запросов потребителей во времени. При решении этой проблемы применяются методы мультиплексирования и множественного доступа (multiple access). Понятия «мультиплексирование» и «множественного доступа» сходны тем, что они предполагают распределение ресурса между пользователями. В то же время между ними есть существенные различия. При мультиплексировании ресурс канала связи распределяется через общее оконечное оборудование, формирующее групповой сигнал $S_\Sigma(t)$. При множественном доступе, $S_\Sigma(t)$ образуется в результате сложения сигналов пользователей непосредственно в канале (рисунок 3.1). На этом рисунке ИС – источник сообщения, ПРД - передатчик, ПРМ - приемник, ПС – получатель сообщения). Множественный доступ характерен для спутниковых каналов, радиоканалов, каналов мобильной связи.

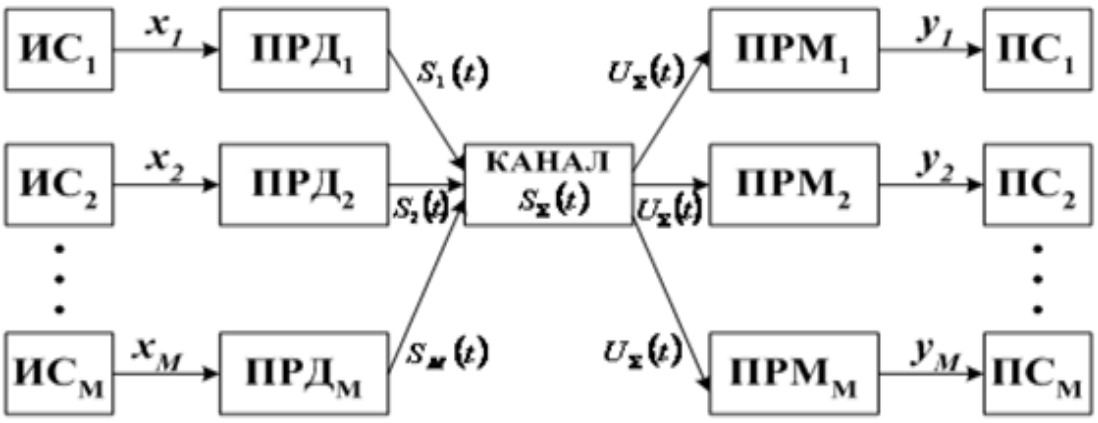



Рисунок 3.1- Система передачи с множественным доступом

Мультиплексирование основано на общем аппаратном обеспечении, а множественный доступ (МД) использует определенные процедуры (протоколы), реализуемые с помощью программного обеспечения, хранящегося

в памяти каждого терминала. На рисунке 3.2 представлены методы мультиплексирования.

В большинстве случаев для мультиплексирования канала источнику сообщений выделяется специальный сигнал, называемый канальным. Промодулированные сообщениями канальные сигналы объединяются, в результате чего образуется групповой сигнал $S_{гр}(t)$. Если операция объединения линейна, то $S_{гр}(t) = S_{\Sigma}(t)$. будет линейным групповым сигналом. Он, как правило, образуется линейным суммированием промодулированных канальных сигналов.

Рисунок 3.2 - Методы мультиплексирования

В системах так называемого комбинационного уплотнения групповой сигнал формируется посредством определенной логической (нелинейной) обработки, в результате которой каждый элемент сформированного сигнала отображает информацию (комбинацию символов) от всех ИС. Классическим примером такой системы является система двукратного частотного телеграфирования. Для передачи четырех комбинаций символов двух каналов используется четыре частоты: $f_1 – 00, f_2 – 01, f_3 – 10, f_4 – 11$.

Устройство разделения линейного группового сигнала $S_{\Sigma}(t)$ представляет собой набор линейных избирательных цепей, каждая из которых выделяет только свой канальный сигнал и в идеальном случае совсем не реагирует на другие канальные сигналы. Для осуществления подобного идеального разделения необходимо и достаточно, чтобы промодулированные канальные сигналы составляли ансамбль линейно независимых сигналов. В качестве таких сигналов обычно используют ансамбли ортогональных сигналов.

В классе линейного уплотнения по виду отличительного признака канального сигнала различают временное разделение каналов (ВРК), частотное

(ЧРК) и разделение каналов по форме сигналов, называемое кодовым разделением каналов (КРК). Вместо термина «разделение» применяют и термин «уплотнение». При ЧРК полоса частот общего канала $\Delta f$ разделяется на несколько более узких полос $\Delta f_i$, каждая из которых образует канал ИС. При ВРК вся полоса $\Delta f$ предоставляется поочередно через определенные интервалы времени различным источникам для передачи сообщений. При КРК нет деления общего канала между ИС ни по частоте, ни по времени. Канальные сигналы различных ИС, перекрываясь по времени и частоте, остаются ортогональными за счет различия формы, что и обеспечивает их разделение.

Возможны варианты комбинирования указанных методов. Так, в мобильной связи в качестве метода множественного доступа широко используются комбинации ЧРК и ВРК, ВРК и КРК. В первой комбинации каждый частотный канал предоставляется нескольким пользователям на определенные промежутки времени. При второй комбинации в полосе частот $\Delta f$ формируют каналы с временным разделением, которые предоставляются нескольким пользователям на принципах КРК.

При организации многоканальной передачи информации, канальные сигналы могут быть заранее определенным образом распределены между источниками сообщений. Такое уплотнение называется уплотнением с закрепленными каналами. Соответствующая ему многоканальная система передачи также будет называться системой с *закрепленными каналами*. Возможна и такая организация многоканальной передачи информации, когда канальные сигналы не распределяются заранее между источниками, а выделяются каждому источнику по мере необходимости. Такое уплотнение называется уплотнением с *незакрепленными каналами*. Очевидно, для правильного разделения каналов в системах с незакрепленными каналами необходимо каким-либо образом передать на приемную сторону адресную информацию.

Основные понятия и определения, введенные для *многоканальных* систем, применимы и для систем *множественного доступа* (МД). К настоящему времени изучено и предложено большое число разнообразных методов МД. Они различаются способом распределения коллективного ресурса канала (фиксированный или динамический), природой процессов принятия решения (централизованные или распределенные), а также степенью адаптации режима доступа к изменяющимся условиям.

Множественный доступ характерен для спутниковых каналов (в этом случае применяют термин «многостанционный доступ»), радиоканалов (пакетная радиосвязь), каналов мобильной связи, а также для многоточечных телефонных линий, локальных сетей.

Для унификации многоканальных систем связи с линейным разделением за основной или стандартный канал принимают канал тональной частоты (канал ТЧ), обеспечивающий передачу сообщений с эффективно передаваемой полосой частот 300…3400 Гц, соответствующей основному спектру телефонного сигнала.

Многоканальные системы образуются путем объединения каналов ТЧ в группы, обычно кратные 12 каналам. В свою очередь, часто используют "вторичное уплотнение" каналов ТЧ телеграфными каналами и каналами передачи данных .

На рисунке 3.3 приведена обобщённая структурная схема системы многоканальной связи.

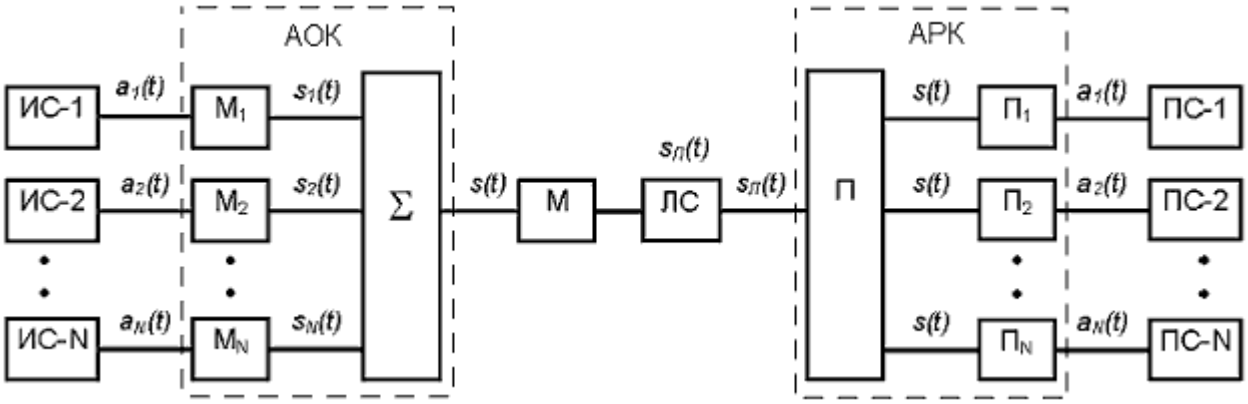



Рисунок 3.3 – Обобщённая структурная схема системы многоканальной связи

Реализация сообщений каждого источника $a_1(t)$, $a_2(t)$,…,$a_N(t)$ с помощью индивидуальных передатчиков (модуляторов) $M_1$, $M_2$, …, $M_N$ преобразуются в соответствующие канальные сигналы $s_1(t)$, $s_2(t)$,…,$s_N(t)$. Совокупность канальных сигналов на выходе аппаратуры объединения каналов (АОК) образует групповой сигнал s(t). Наконец, в групповом передатчике М сигнал s(t) преобразуется в линейный сигнал $s_Л(t)$, который и поступает в линию связи ЛС. Допустим, что линия пропускает сигнал практически без искажений и не вносит шумов. Тогда на приемном конце линии связи линейный сигнал $s_Л(t)$ с помощью аппаратуры разделения каналов (АРК) может быть вновь преобразован в групповой сигнал s(t). Канальными или индивидуальными приемниками $П_1$, $П_2$, …, $П_N$ из группового сигнала s(t) выделяются соответствующие канальные сигналы $s_1(t)$, $s_2(t)$, …,$s_N(t)$ и затем преобразуются в предназначенные получателям сообщения $a_1(t)$, $a_2(t)$, …, $a_N(t)$ .

Канальные передатчики вместе с суммирующим устройством образуют аппаратуру объединения. Групповой передатчик М, линия связи ЛС и групповой приемник П составляют групповой канал связи (тракт передачи), который вместе с аппаратурой объединения и индивидуальными приемниками составляет систему многоканальной связи.

Индивидуальные приемники системы многоканальной связи $П_K$ наряду с выполнением обычной операции преобразования сигналов $s_K(t)$ в соответствующие сообщения $a_K(t)$ должны обеспечить выделение сигналов $s_K(t)$ из группового сигнала s(t). Иначе говоря, в составе технических устройств на передающей стороне многоканальной системы должна быть предусмотрена аппаратура объединения, а на приемной стороне – аппаратура разделения.

Чтобы разделяющие устройства были в состоянии различать сигналы отдельных каналов, должны существовать определенные признаки, присущие только данному сигналу. Такими признаками в общем случае могут быть

параметры переносчика, например амплитуда, частота или фаза в случае непрерывной модуляции гармонического переносчика. При дискретных видах модуляции различающим признаком может служить и форма сигналов. Соответственно различаются и способы разделения сигналов: частотный, временной, фазовый и другие .

***Принцип временного разделения каналов.*** Многоканальные системы с ВРК широко используются для передачи аналоговой и дискретной информации. Принцип временного объединения каналов удобно пояснить с помощью синхронно вращающихся распределителей на передающей и приемной стороне (рис. 3.4).

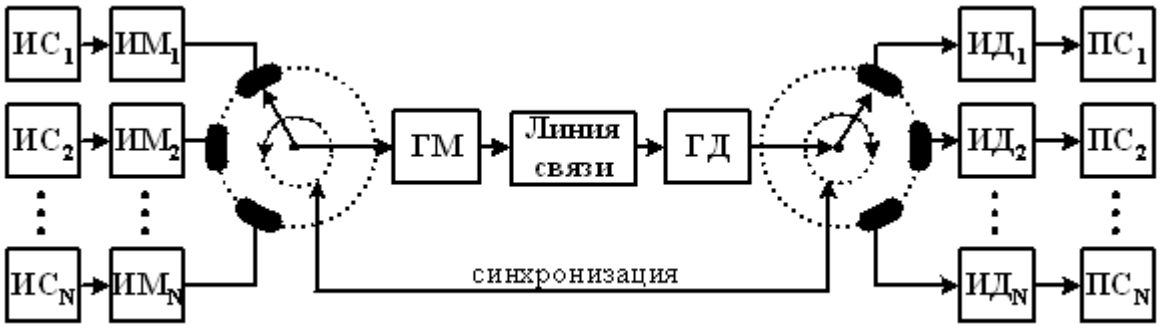



Рисунок 3.4 – Упрошенная схема системы с ВРК

Основные этапы образования группового сигнала $S_{\Sigma}(t)$ показаны на рис.3.5.

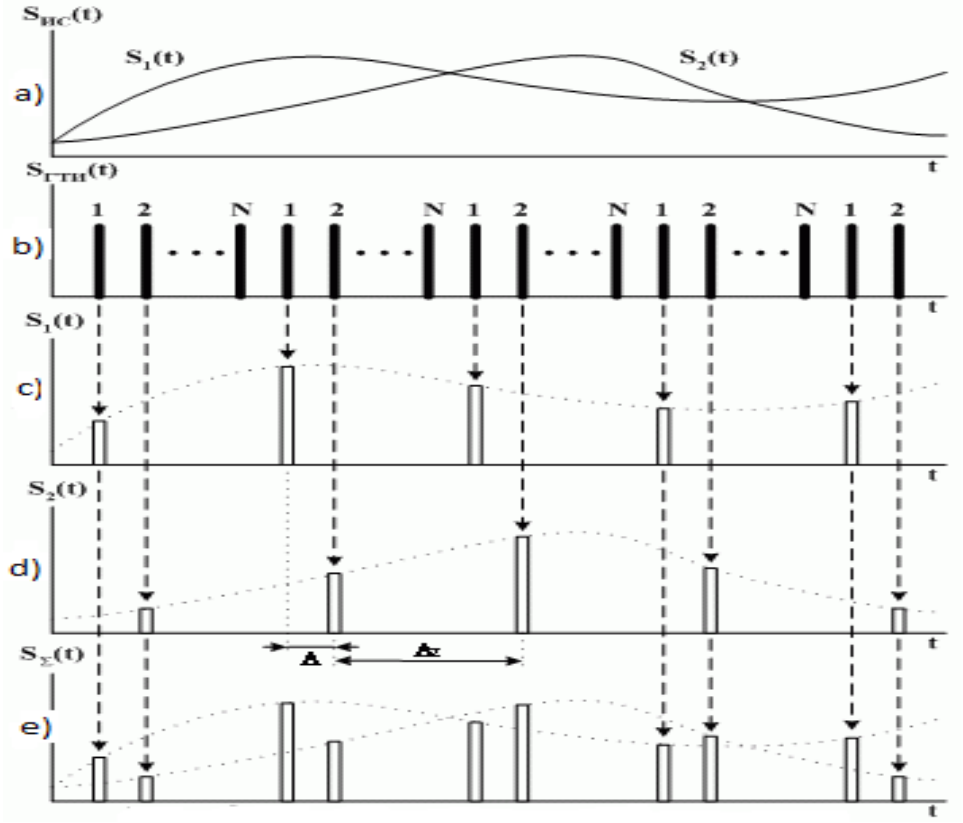



Рисунок 3.5. – Сигналы при временном разделении каналов

Информация от $N$ источников аналоговых сигналов поступает на входы соответствующих индивидуальных импульсных модуляторов АИМ (ШИМ, ФИМ). Формируемые отсчеты сигналов $S_1(t)$ на выходе первого импульсного

модулятора ( $ИМ_1$ ) (рисунок 3.5,b), $S_2(t)$ на выходе второго импульсного модулятора ( $ИМ_2$ ) (рисунок 3.5,d) берутся через одинаковый интервал $\Delta t = \frac{1}{2F_{max}}$ , но с таким сдвигом $\Delta$ во времени, чтобы они не перекрывались. Затем передающий распределитель считывает импульсы от всех источников, формируя сигнал $S_\Sigma(t)$ (рисунок 3.5,e), спектр которого с помощью группового модулятора (ГМ) переносится в область частот, отведенных для данной линии связи. Групповой сигнал $S_\Sigma(t)$ , передаваемый по линии связи, несет информацию как от первого, так и о второго источника одновременно. На приемной стороне с выхода группового демодулятора (ГД) импульсы группового сигнала $S_\Sigma(t)$ поступают на вращающиеся контакты приемного распределителя для формирования канальных последовательностей $S_1(t)$ , $S_2(t)$ и т.д. из которых на выходе импульсных детекторов формируются непрерывные сигналы поступающие к получателям сообщений.

Следует подчеркнуть, что (рисунок.3.4) служит лишь для иллюстрации идеи временного уплотнения и не отражает современных технических методов коммутации. В действительности аппаратура временного уплотнения обходится без механических распределителей, которые заменены электронными распределителями, выполняющими те же функции (рисунок 3.6).

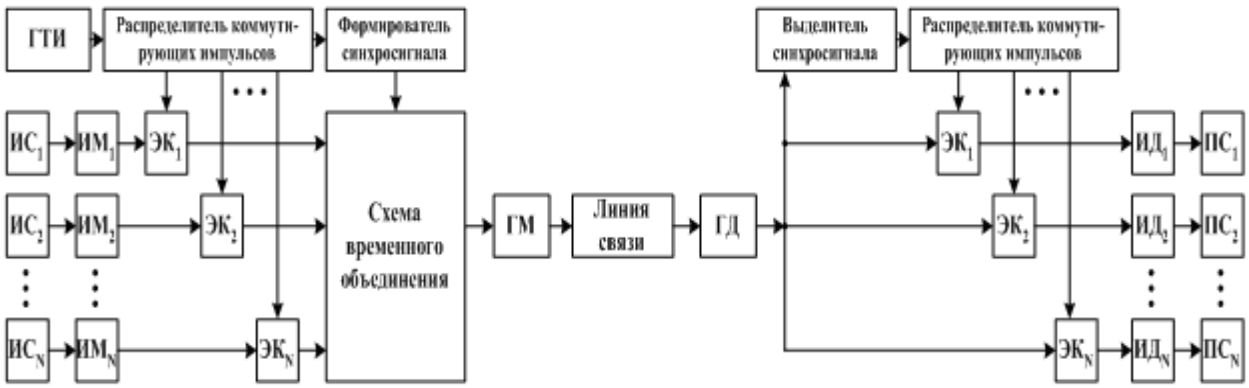



Рисунок 3.6 - Схема многоканальной связи с ВРК

Выходы всех импульсных модуляторов подключены к «своим» электронным ключам, работой которых управляет распределитель коммутирующих импульсов. В свою очередь, распределитель запускается от генератора тактовых импульсов.

Временное разделение сигналов осуществляется устройством, упрощенная структурная схема которого представлена на рисунке 3.6. Принятый групповой радиосигнал в групповом демодуляторе преобразуется в групповую импульсную видеопоследовательность и поступает одновременно на входы выделителя синхросигнала и канальные электронные коммутаторы.

Процесс временного разделения производится в два этапа. На первом – этапе вхождения системы в синхронизм происходят поиск, обнаружение и выделение сигналов синхронизации, после чего запускается распределитель канальных коммутирующих импульсов. Распределитель формирует на своих выходах импульсы требуемой длительности и такой очередности, при которой в каждый канальный интервал открывается лишь один электронный коммутатор соответствующего канала. На втором этапе производится демодуляция каждого канального импульса, после чего сигналы принимаемых каналов подаются к получателям аналоговой информации. При временном разделении каналов важнейшую роль играет система синхронизации, алгоритм работы которой каждый раз выбирается индивидуально для принятого способа импульсной модуляции, способа временного объединения каналов, структуры сигналов синхронизации и т.д. Каждый импульсный модулятор будет подключаться через электронный ключ к схеме временного объединения только в канальные интервалы времени длительностью $T_k = \frac{T_i}{N}$, выделенные в групповом цикле для передачи информации по данному каналу. Период повторения этих интервалов для $T_i$ одного и того же канала называют периодом дискретизации по времени или тактовым интервалом. Очевидно, коммутация каналов должна происходить синхронно и синфазно на передающей и приемной сторонах линии связи.

В настоящее время применяются два способа коммутации каналов в схеме временного объединения. Первый способ заключается в том, что каждый канал подключается периодически и переход от одного канала к другому происходит в строго заданной очередности. Системы с таким способом опроса называют синхронными. При втором способе опрос производится непериодически и не в заранее заданной очередности, а произвольным образом. В этом случае система является асинхронной.

В рассматриваемой синхронной системе для безошибочного опознавания и разделения информационных (канальных) импульсов на приемной стороне в групповой многоканальный сигнал вводятся специальные импульсы, называемые импульсами синхронизации. Синхросигнал формируется специальным устройством и вводится в групповой видеосигнал на строго определенную временную позицию (рисунок 3.5), благодаря чему на приемной стороне каждый информационный импульс попадает на вход только своего тракта обработки. Обычно синхросигнал – отличается от информационных видеоимпульсов каким-либо параметром (амплитудой, длительностью, фазой и т.д.), что необходимо для его надежного обнаружения и выделения.

Группу видеоимпульсов (информационных и синхронизирующих), полученных на выходе схемы временного объединения в результате однократного опроса всех источников, сигналов, называют циклом, а соответствующий этому временной интервал – длительностью цикла $T_ц$ (рисунок 3.8). Заштрихованный на рисунке 3.5 импульс N называют сигналом цикловой (групповой) синхронизации. Поскольку видеоимпульсы различных каналов следуют друг за

другом в строгой очередности, в их временном положении заключена информация о номере канала. В дальнейшем групповой видеосигнал подается на вход группового модулятора, где преобразуется в линейный радиосигнал, пригодный для передачи по линии связи.

Существуют другие виды импульсной модуляции: ШИМ, ФИМ, дифференциальная ДИКМ, дельта-модуляция, ИКМ (Рисунки 3.7, 3.8, 3.9.)

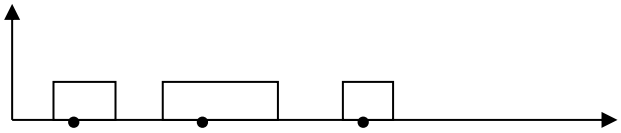


Рисунок 3.7 - ШИМ – широтно–импульсная модуляция

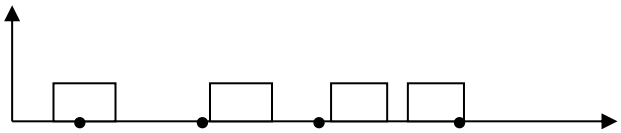


Рисунок 3.8 - ФИМ –фазово-импульсная модуляция

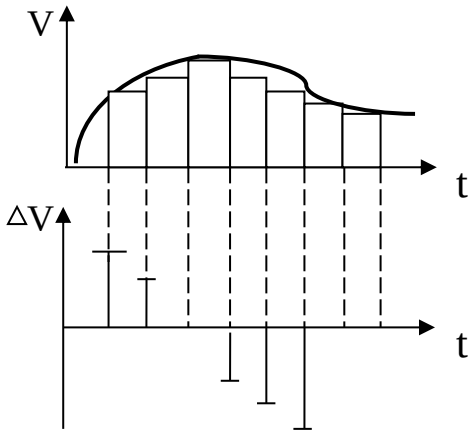



Рисунок 3.9 - Дифференциальная ИКМ

Мгновенные значения дискретных отчетов сигнал в соседних точках дискретизации мало отличаются друг от друга, поэтому передавать можно на сами отчеты, а кодированные значения разности соседних отчетов, амплитуда которых меньше амплитуд самих отчетов. Поэтому разрядность кодовой группы уменьшается и снижается скорость передачи цифрового потока.

Для преобразования аналогового сигнала в цифровой используются операции: дискретизация, квантование, кодирование.

Дискретизация осуществляется на основе теоремы Котельникова. Для сигналов ТЧ с полосой 0,3 – 3,4 кГц + 0,9 кГц (защитный интервал), т.е. $f_в$ = 4 кГц. Тактовая частота дискретизации $f_m = 2f_в$ = 8 кГц. Каждый отсчёт передаётся 8 битами, значит сигнал ТЧ можно передавать со скоростью $f_m \times$ 8 бит = 8×103 ×8 = 64 кбит/с.Это и есть скорость передачи одного канала ТЧ.

Отсчёты передаются в виде восьмиразрядных двоичных чисел, получаемых при квантовании отсчётов. Т.к. квантование имеет конечное

число уровней, да ещё ограничения по max и min, то очевидно, что квантованный сигнал не является точным. Разница между истинным значением отсчёта и его квантованным значением – это шум квантования. Значение шума квантования зависит от количества уровней квантования, скорости изменения сигнала и от способа выбора шага квантования.

## Лекция №4. Принцип построения цифровых систем передачи

*Цель лекции: ознакомиться с амплитудно-импульсной модуляцией,с линейным и нелинейным кодированием*

К цифровым относятся системы передачи, в которых все виды сообщений передаются посредством цифровых сигналов.Самый распространенный метод аналого-цифрового преобразования – это импульсно-кодовая модуляция (ИКМ). Преобразование аналогового сигнала в ИКМ осуществляется в три этапа.

1. *Дискретизация*. Аналоговый сигнал дискретизируется по времени в соответствии с теоремой Котельникова, при этом образуется последовательность отсчетов этого сигнала (рисунок 4.1). Этот процесс называется амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ). АИМ сигналы бывают двух видов. АИМ первого рода, когда вершины импульсов повторяют форму аналогового сигнала. АИМ второго рода, когда вершины импульсов плоские.

Спектральная плотность аналогового и дискретного сигналов представлена на рисунке 4.2. На приеме исходный сигнал выделяется фильтром нижних частот.

Временная дискретизация непрерывных сигналов и восстановление их происходит с определенной погрешностью. Погрешность дискретизации связана с тем, что реальные сигналы имеют конечную продолжительность и, вследствие этого, неограниченный спектр. Ограничение спектра для выбора частоты дискретизации приводит к тому, что часть спектра оказывается отброшенной и не участвует впоследствии в восстановлении спектра. Этот процесс неизбежен.

На приеме исходный сигнал выделяется фильтром нижних частот. Относительная ширина расфильтровки фильтра:

$$\delta = \frac{F_Д - 2F_В}{F_В}.$$

Это возможно лишь в том случае когда ($F_Д$ - $F_В$) буде выше $F_В$.

В результате дискретизации мы получаем сигнал дискретный по времени и непрерывный по амплитуде. $F_Д$ должно быть не много больше 2 $F_В$.

Поэтому $F_Д$= (2,2 ÷2,4) $F_В$. Для цифровых систем передачи $F_Д$= 8 кГц – стандартная частота.

2.*Квантование по уровню*. На втором этапе осуществляется квантование АИМ сигнала по амплитуде. При этом весь диапазон значений сигнала разбивается на допустимые уровни квантования. При этом интервал между двумя

ближайшими уровнями квантования называют *шагом квантования*. На данном этапе импульсы квантованного по времени АИМ сигнала, заменяются импульсами, амплитуда которых совпадает с ближайшим допустимым уровнем

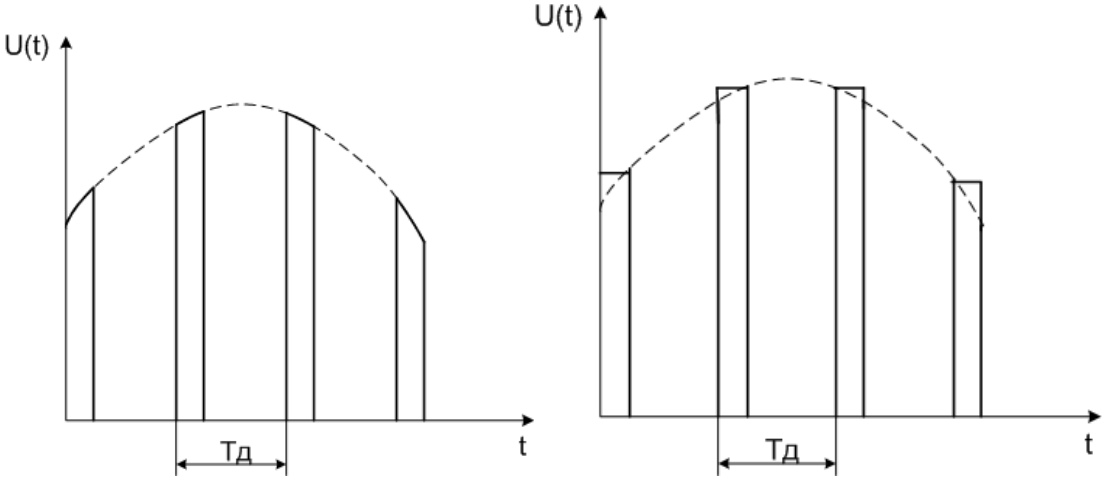



Рисунок 4.1 – Сигнал, дискретный по времени

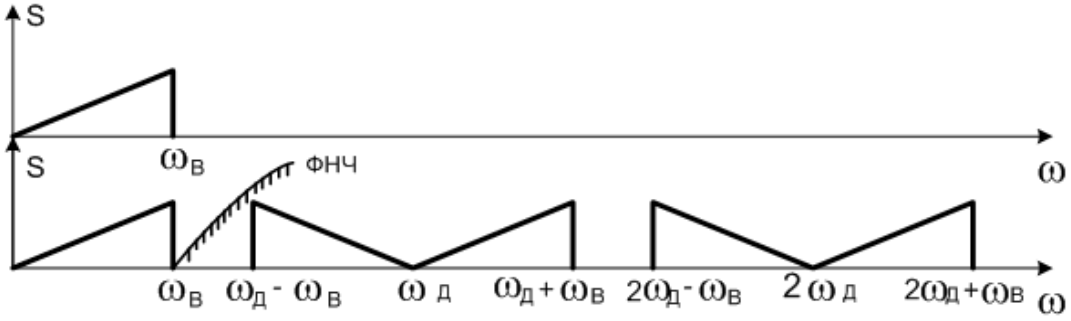



Рисунок 4.2 – Спектры исходного и АИМ сигналов квантования.

Квантованный по амплитуде сигнал можно однозначно записать последовательностью цифр, характеризующих высоту импульсов этого сигнала в условных единицах (шагах квантования). Например в нашем случае квантованный сигнал можно представить в следующей последовательности цифр: ( 2, 5, 7, 7, 7, 5, 3) (рисунок 4.3). Причем по данной последовательности уже не возможно точно восстановить форму исходного сигнала, т.к. амплитуда квантованного сигнала принимает лишь определенные значения, отличные от истинных. Квантование сигналов сопровождается определенной погрешностью, которая тем меньше, чем меньше шаг квантования. Разность между исходным и квантованным сигналами называется *шумом квантования* ($\xi_{кв}$).

$$\xi_{кв}(t) = U(t) - U_{кв}(t)$$

Максимальная ошибка квантования не должна превышать половины шага квантования.

$$\xi_{кв\,max} = \frac{\Delta}{2}$$

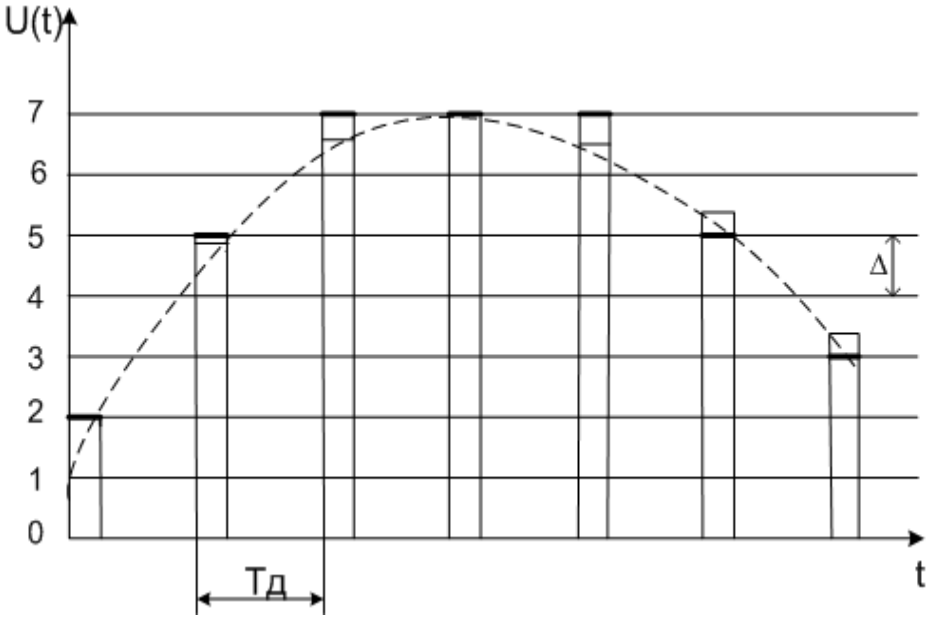



Рисунок 4.3 – Квантование по уровню

3.*Кодирование* На третьем этапе осуществляется преобразование многоуровнего цифрового сигнала в многоразрядный двоичный сигнал, т.е. ИКМ сигнал. При этом каждому импульсу многоуровнего сигнала, в зависимости от его амплитуды, ставится в соответствие кодовая комбинация, состоящая из m разрядов. Количество разрядов двоичного кода определяется числом амплитудных градаций M. Если максимальное значение кодируемого сигнала равно $U_{c\ max}$, то:

$$M = \left( \frac{kU_{c\max}}{\Delta} \right) + 1$$

где k равно 2 для двухполярного сигнала или равно 1 для однополярного сигнала. Например, одноразрядным двоичным числом m=1, можно записать только два состояния 0 или 1, двухразрядным m=2 - четыре состояния, т.е. M = 4. Связь между числом разрядов m и числом возможных состояний M определяется соотношениями:

$$M = 2^m, \quad (1.5)$$

$$m = \log_2 \left( \frac{kU_{c\max}}{\Delta} + 1 \right)$$

В нашем примере используется 8 уровней квантования (0,1,2,3,4,5,6,7) (смотрите рисунок 30), следовательно, минимальное число разрядов должно быть равно 3 ($m=\log_2 8=3$). Множество используемых кодовых комбинаций

называется *кодом*. Простейшим кодом является натуральный двоичный код, у которого кодовые комбинации представляют собой запись номера уровня квантования в двоичной системе счисления. Такая запись имеет вид

$$L = a_{m-1} \cdot 2^{m-1} + a_{m-2} \cdot 2^{m-2} + \ldots + a_0 \cdot 2^0,$$

где a принимает значения 0 или 1; m – число разрядов в кодовой группе. Такой код используется при кодировании однополярных сигналов. Например, в нашем случае (на рисунке 30), первый отсчет закодируем так:
$2 = 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 2$. Соответствующая кодовая комбинация имеет вид 010.
Следующий отсчет закодируем: $5 = 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 4+1$. Кодовая комбинация: 101.И так далее.
Для двухполярных сигналов используется симметричный код, где старший знак разряда несет информацию о знаке.

***Мощность шума квантования.***

В простейшем случае при *равномерном* шаге квантования, когда все шаги $\delta_i$ одинаковы, получим $\sigma^2_{KB} = \frac{\delta^2}{12}$ - т.е. зависит лишь от шага квантования и не зависит от уровня сигнала.

При заданном динамическом диапазоне сигнала D величина шага δ однозначно определяет необходимое число уровней квантования M

$$M = \frac{D}{\delta}.$$

При равномерном шаге квантования помехозащищённость сигнала от помех будет существенно разной для отсчётов сигнала с малой амплитудой и с большой. Дело в том, что при равномерном шаге квантования шумы квантования будут одинаковыми и для малых, и для больших уровней сигнала. А значит отношение $P_C / P_Ш$ для малых сигналов может оказаться “плохим”. Можно было бы увеличить число уровней квантования, например, более 8 бит на выборку, но тогда придётся увеличивать скорость передачи и возрастает вероятность ошибки (с ростом M).

Помехозащищенность в телефонном канале для обеспечения высокого качества связи должна быть $A_з = P_c / P_ш = 32{,}5$ дБ. При постоянстве помехозащищенности шаг квантования определяется мгновенными значениями сигнала $\boldsymbol{\delta_i = u_{вх} \sqrt{12} * 10^{-0{,}05 A_з}}$.

Для улучшения ситуации на практике используют методы нелинейного двоичного кодирования (нелинейная кодификация). Эти методы основаны на принципах компандерного расширения динамического диапазона сигнала. Входной сигнал сжимается с помощью *компрессора* до уровня, приемлего для передачи по данному каналу связи, а на выходе (приёмной стороне) канала сигнал с помощью *эспандера* вновь восстанавливается. При этом слабые сигналы остаются почти без изменения, а сигналы большого уровня «поджимаются». Тем самым быстрота нарастания/убывания сигналов малого и большого уровней как бы сравниваются и тогда число уровней становится

почти одинаковым. Наиболее хорошо подходят для компандирования/экспандирования законы типа exp(x) и ln(x) соответственно.

Наиболее широко используются стандартизованные законы (для симметричного двухполярного входного сигнала).

**А - закон**:

***y=sgn (x)[z(x)/(1+lnA)],***

где **A = 87,6**; $x=u_{вх}/U_{огр}$; $z=A\cdot|x|$; для $0 \le x \le 1/A$

или $z=1+\ln|x|$, для $(1/A) \le x \le 1$.

Этот закон используется в Европейских системах ИКМ.

Для А – закона минимальный шаг квантования 2/4096 = 1/2048, точнее $\delta_i \approx \frac{dx}{dy}\Big|_{X=X_i} \frac{2}{M}$.

**μ - закон** – используется в Американских системах ИКМ (D1 с μ = 100 и D2 с **μ = 255**).

$$y = \mathrm{sgn}(x)[\ln(1+\mu|x|)/\ln(1+\mu)]$$

Для μ - закона минимальный шаг квантования 2 / 8159.

Иногда эти законы записывают так:

$$U_{ВЫХ} = U_{ОГР} \cdot \mathrm{sgn}(U_{ВХ}) \frac{\ln\left(\mu|U_{ВХ}|/U_{ОГР}+1\right)}{\ln(1+\mu)}$$

$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} \dfrac{AU_{ВХ}/U_{ОГР}}{1+\ln A}, 0<|x|<\dfrac{1}{A} \\ \dfrac{1+\ln(AU_{ВХ}/U_{ОГР})}{1+\ln A}, \dfrac{1}{A}<|x|<1 \end{cases}$$

Введение нелинейного квантования позволяет при той же помехозащищённости уменьшить в 1,5 раза число необходимых разрядов (используют по 8 разрядов) по сравнению с линейным законом, а значит в 1,5 раза снижается полоса необходимых частот.

На практике характеристики А или μ законов выполнить чисто логарифмически сложно. Поэтому их выполняют в виде линейно – ломаных кривых, составленных из сегментов для положительных и отрицательных значений сигнала. Это существенно упрощает техническую реализацию компандера и экспандера. Вершины сегментов совпадают с логарифмической кривой, а по вертикали все приращения Δy кривой одинаковы. В μ - законе используют 15 сегментов (8 для положительного сигнала и 8 для отрицательного сигнала). Если первые (от нуля) сегменты для положительного и отрицательного сигнала имеют одинаковый наклон, то они будут как бы одним «длинным» сегментом и тогда получается 15 сегментов. Для А – закона компандирования по 8 сегментов для положительного и отрицательного сигнала, из которых возле нуля по два сегмента каждой полярности общие. В

результате получается 13 сегментов. Если $U_{мах}$ сигнала принять за **1**, то первый сегмент занимает по оси х 1/128, следующий 1/64, затем 1/16, 1/4, 1/2.

Характеристики μ=225/15сегм. и А=87,6/13сегм. стандартизированы и рекомендованы МСЭ (Рекомендация G. 711). В международной связи используется μ–закон. В Европе и Казахстане А–закон.

Для упрощения реализации кодера сегментные промежутки, наклон сегментов, внутрисегментные промежутки (кроме 0-1 сегмента) находятся в соотношениях, кратных 2-м. В разных сегментах число уровней квантования различно, но в пределах каждого сегмента - одинаково.

Характеристика компандирования типа А-87, 6/13приведена на рисунке 4.4.

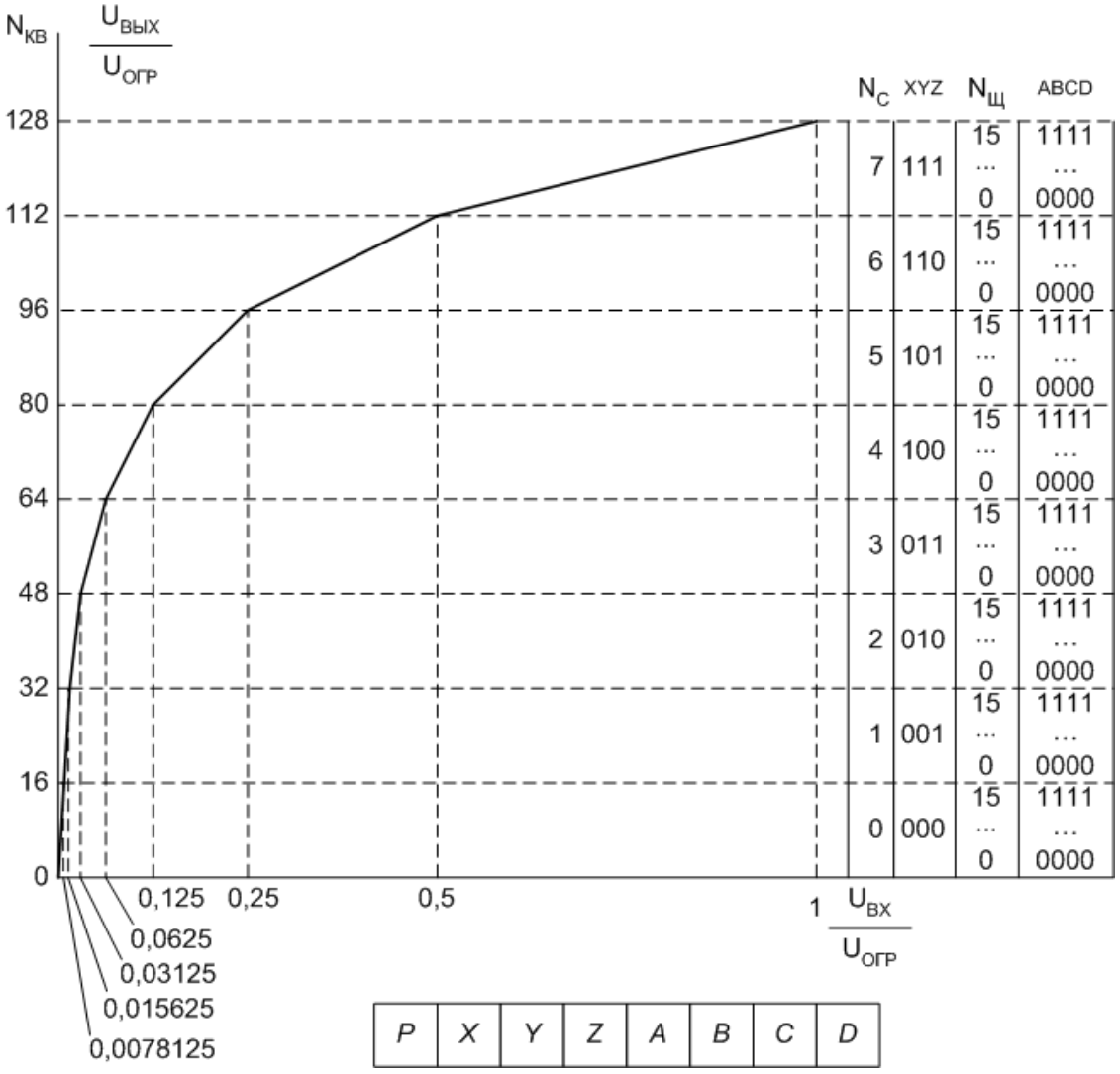



Рисунок 4.4 - Характеристика компандирования типа А-87, 6/13

**Лекция №5. Узлы аппаратуры ЦСП**

*Цель лекции: Рассматриваются схема кодера и декодера взвешивающего типа, генераторное оборудование ЦСП, виды синхронизации, аналого-цифровое оборудование*

***Линейный кодер поразрядного сравнения.*** Наибольшее распространение в СП с ИКМ среди линейных кодеков получает кодер поразрядного сравнения (Рисунок 5.1). В процессе кодирования происходит сравнение величины отсчета сигнала с эталонными напряжениями, пропорциональными весу кода. Число последовательных операций сравнения равно числу разрядов кода. Величина отсчета сигнала Uc выражается в виде суммы определенного набора эталонных напряжений..

$$Uc = \sum_{i=1}^{m} U_{эmi} a_i \quad , \qquad (5.1)$$

где $U_{эmi}$–это напряжение i-го разряда;

$a_i$–кодовый символ i-го разряда;

m–число разрядов.

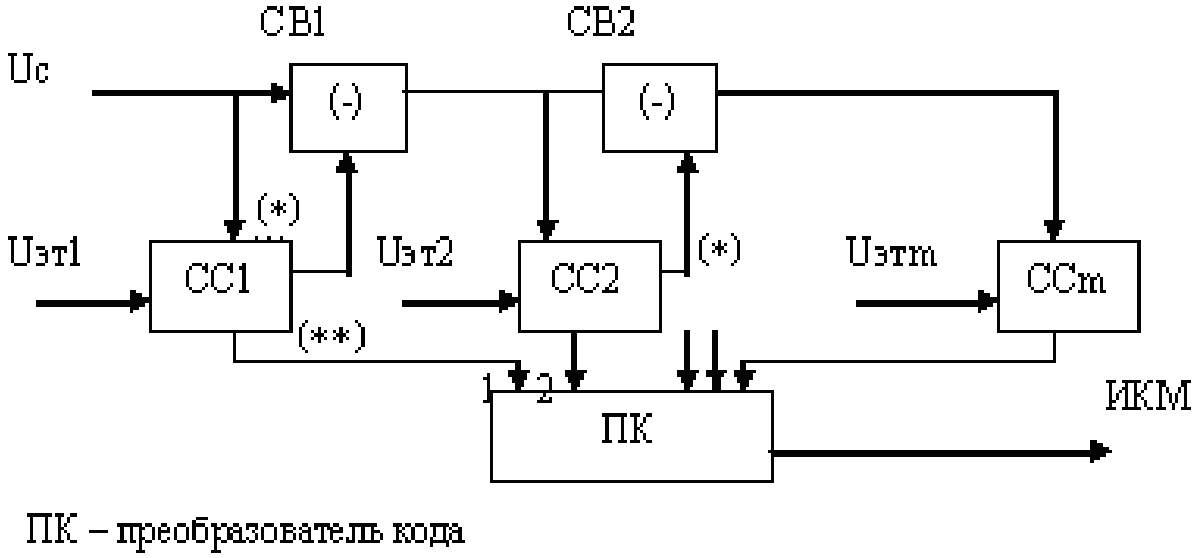



Рисунок 5.1 – Линейный кодер поразрядного сравнения

В начале цикла кодирования на схеме сравнения $СС_1$ подается напряжение сигнала $U_c$ (кодируемого), а на другой вход схемы сравнения $СС_1$ подается эталонное напряжение наибольшего веса $U_{эт1}=2^{m-1}\Delta U_к$. Если $U_c>U_{эт1}$, то на выходе схемы сравнения $СС_1$ появляется $U_{эт1}$(*), которое подается в схему вычитания $СВ_1$ , где вычитается из $U_c$, т.е. $U_c-U_{эт1}$. В этом случае на выходе второй схемы сравнения $СС_2$ формируется единица – первый символ кодовой группы. На схемах $СС_2$ и $СВ_2$ второго каскада будет подаваться напряжение $U_c-U_{эт1}$, которое в схеме сравнения $СС_2$ будет сравниваться с эталоном следующего веса $U_{эт2}=2^{m-2}\Delta U_к$. Если же $U_c<U_{эт1}$, то на выходе (*) схемы сравнения $СС_1$ сигнал появляться не будет. В этом случае на выходе 2 схемы сравнения $СС_1$ будет формироваться первый символ «ноль». На схемах $СВ_2$ и $СС_2$ второго каскада будет подаваться напряжение $U_c$, которое также будет сравниваться с $U_{эт2}$. Следующие каскады работают аналогично. Преобразователь кода (ПК) преобразует получаемый параллельный код в последовательный, в котором сигналы передаются последовательно по времени по одному проводу. От величины эталонного напряжения $U_{эт}$ будет зависеть,

каким будет являться кодер: линейным или нелинейным. Когда используется одно эталонное $U_{эт1}$, а остальные $U_{эт}$ получаются посредством его деления пополам, то будем иметь линейный кодер, а если уровень последующих $U_{эт}$ формировать по какому-то другому закону (напряжение через компандер), то получим нелинейный кодер.

В настоящее время в системах ЦСП наиболее широкое распространение получили нелинейные кодеки взвешивающего типа, которые представляют собой 13 - сегментную аппроксимацию квазилогарифмических функций типа А87,6/13. Эта характеристика соединяет 16 сегментов по 8 в положительной области, и по 8 в отрицательной области, аппроксимирующих квазилогарифмическую функцию. Два положительных и два отрицательных центральных сегмента имеют одинаковый наклон и равные шаги квантования, поэтому их считают единым сегментом, а аппроксимацию – 13-ти сегментной.

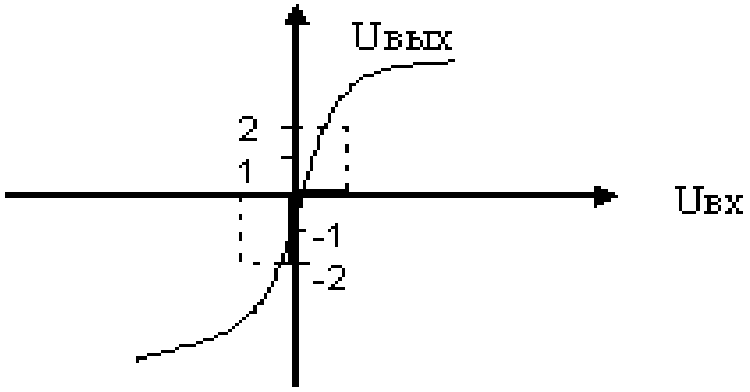



Рисунок 5.2 – АХ нелинейных кодеков

В пределах каждого сегмента шаг квантования постоянен, и в данном сегменте укладывается 16 шагов квантования.

В таблице 5.1 приведены значения эталонных сигналов, с помощью которых в каждом сегменте формируются 16 уровней квантования.

Таблица 5.1 Значения эталонных сигналов

| *Сегмент* | *Двоичный код* | *Шаг квантования* | *Эталонная и нижняя границы* |
|---|---|---|---|
| 1 | 000 | $\Delta U_o$ | 0 |
| 2 | 001 | $\Delta U_o$ | $16\Delta U_o$ |
| 3 | 010 | $2\Delta U_o$ | $32\Delta U_o$ |
| 4 | 011 | $4\Delta U_o$ | $64\Delta U_o$ |
| 5 | 100 | $8\Delta U_o$ | $128\Delta U_o$ |
| 6 | 101 | $16\Delta U_o$ | $256\Delta U_o$ |
| 7 | 110 | $32\Delta U_o$ | $512\Delta U_o$ |
| 8 | 111 | $64\Delta U_o$ | $1024\Delta U_o$ |

Число уровней квантования при кодировании однополярных сигналов по таблице 5.2 равно 128. Эти уровни могут быть сформированы с помощью одиннадцати эталонных напряжений и отображены с учетом необходимости кодирования полярности отсчета с помощью 8-разрядной кодовой группы. Старший разряд кода несет информацию о знаке (+ или - ). Следующие 3

разряда кода несут информацию о номере сегмента. Последние 4 разрешенных кода создают информацию о номере отсчета в пределах сегмента. После этого определяется номер сегмента в три такта. В первом такте кодируется амплитуда отсчета $U_c$, сравнивается с эталонным напряжением нижней границы пятого сегмента ($U_{эт5}=128\Delta U_o$). Оставшаяся часть таблиц делится опять пополам и снова сравнивается с уровнем сегмента. На рисунке 5.3 приведена функциональная схема нелинейного кодера взвешивающего типа.

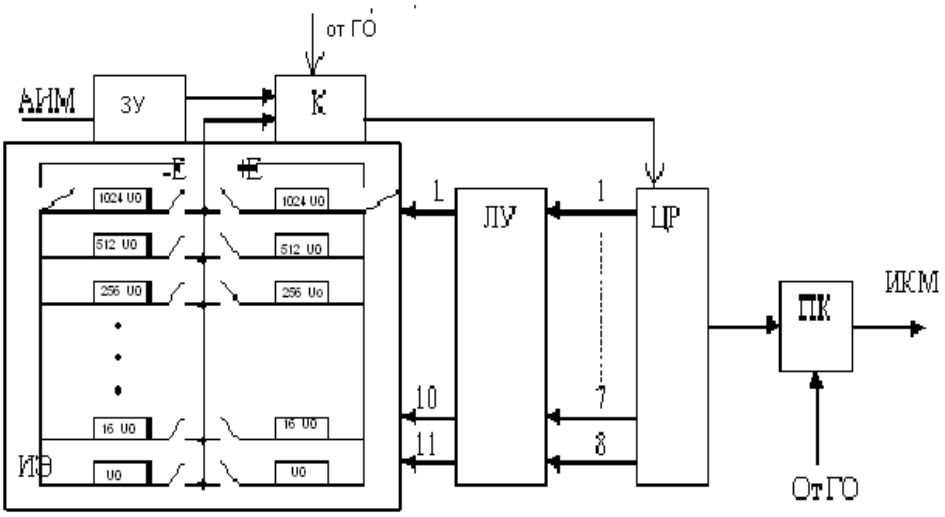



Рисунок 5.3 – Функциональная схема нелинейного кодера взвешивающего типа

К – компаратор, который определяет полярность отсчета и знак разности между амплитудой кодируемого отсчета и суммой эталонных напряжений. После каждого такта кодирования решение компаратора записывается в цифровой регистр (ЦР). В зависимости от решения компаратора ЦР выбирает полярность источника элемента (ИЭ) и управляет работой цифровой логики, которая преобразует разрядный код в 11-разрядный и формирует в блоке выбора и коммутации эталонных напряжений цепи управления источника эталонов ($ИЭ_т$), определяя величины эталонов, подключаемых на вход 2 компаратора. Кодирование занимает восемь тактов. В каждом такте ЦР выставляет пробную единицу в соответствующий разряд выходного слова, которое начинается со старшего. Все остальные равны нулю, т.е. на выходе ЦР формируется 8-разрядный код, управляющий ЛУ. ЛУ по этому коду замыкает соответствующие ключи в $ИЭ_т$. В результате на выходе $ИЭ_т$ появляется эталонный сигнал, который сравнивается в компараторе с кодированным сигналом. Если $U_c>U_{эт}$, то на выходе $K\rightarrow 0$ , что говорит о том, что единица, выставляемая ЦР в соответствующем разряде была верная, и она остается на этом месте. Когда на выходе $K\rightarrow 1$, это значит, что 1, выставляемая ЦР в соответствующем разряде, была ошибочной, и она заменяется на нуль и т.д. ПК преобразует параллельный код в последовательный код следующим образом:

11100010=576$\Delta U_o$. Например, $U_{вх}$=606$\Delta U_o$, то ошибка квантования равна: $\Delta U$=606-576=30$\Delta U_o$.

При данном способе кодирования величина ошибки квантования находится в пределах от 0 до $\Delta U_i$, где $\Delta U_i$ – шаг квантования в соответствующем сегменте. По окончании восьми тактов кодирования сформированный в ЦР код через ПК в последовательном виде выделяется на нужное устройство.

Процессы кодирования и декодирования и правильного распределение сигналов по каналам возможны лишь в том случае, когда приходящая из линии импульсная последовательность и формируемые генераторным оборудованием приема управляющие импульсные последовательности будут строго совпадать по частоте и по фазе. То есть генераторное оборудование приема должно работать синхронно с генераторным оборудованием на передаче. Это достигается при помощи специальных устройств синхронизации.

В системах с ИКМ различают тактовую и цикловую синхронизацию. Частным случаем цикловой синхронизации можно считать сверхцикловую синхронизацию.

***Генераторное оборудование***

Генераторное оборудование (ГО) необходимо для получения импульсных последовательностей, используемых для :

- управления работой узлов аппаратуры;
- для синхронизации соответствующих узлов передающей и приемной станций;
- для определения порядка и скорости обработки сигналов в тракте передачи и приема.

Структура управляющих сигналов вырабатываемых ГО определяется структурой цикла и сверхцикла системы передачи (рисунок 5.4).

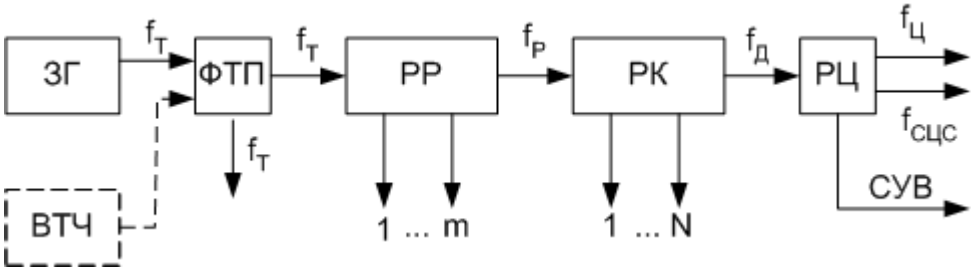
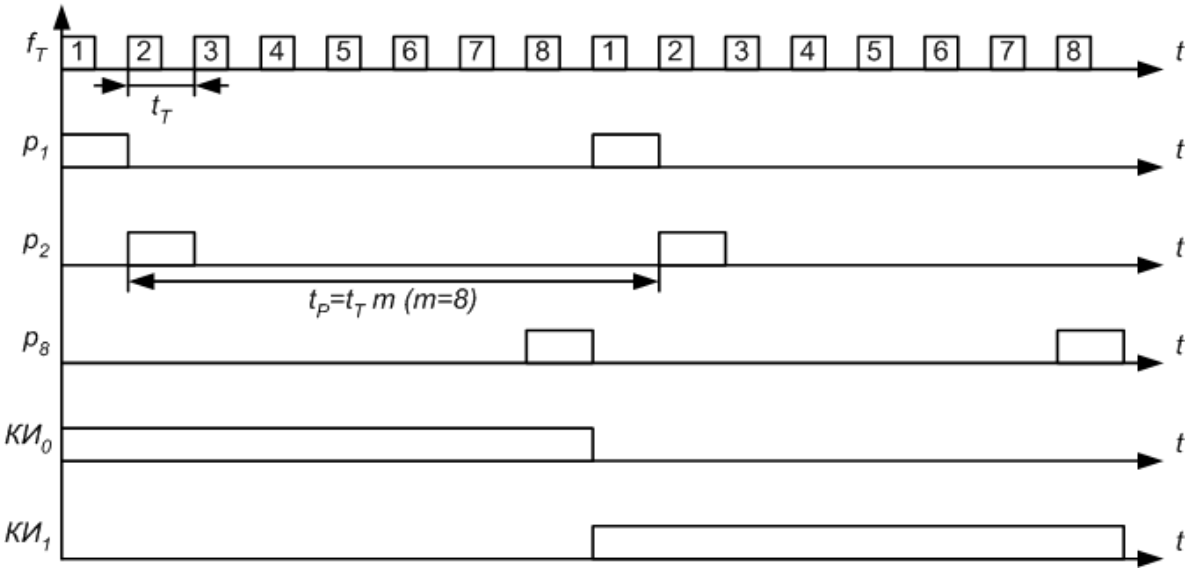


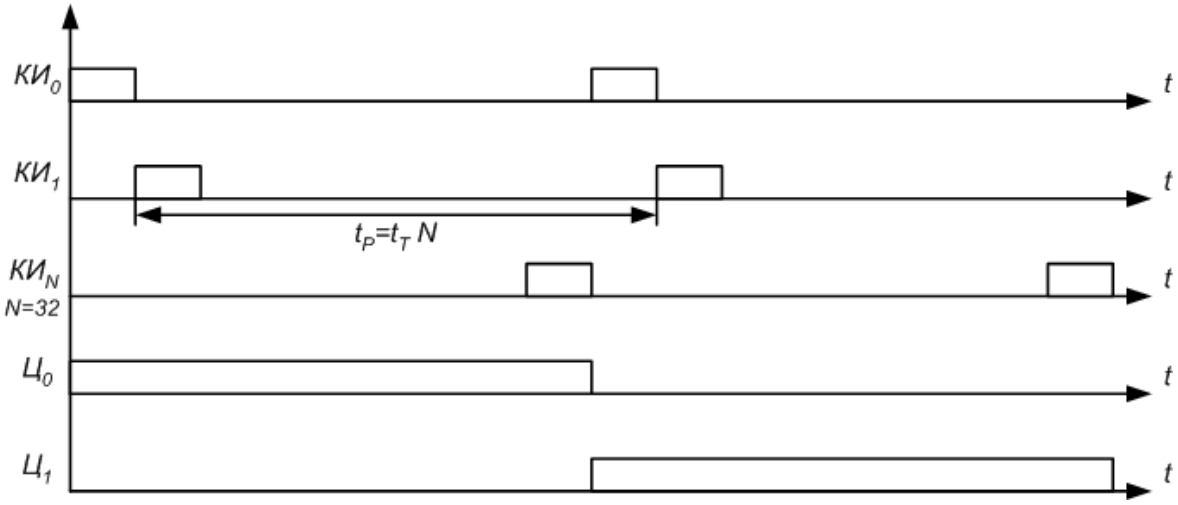

Рисунок 5.4 – Структурная схема ГО первичной ЦСП

В задающем генераторе (ЗГ) формируется гармонический высокостабильный сигнал с тактовой частотой fт=2048кГц (для первичной ЦСП). Формирователь тактовой последовательности (ФТП) вырабатывает основную импульсную последовательность с частой следования fт и скважностью Q=2. Эта частота поступает на распределитель разряда (РР), который формирует m импульсных последовательностей, где m разрядность кода. Эти импульсные последовательности используются для правильного определения каждого разряда комбинации, при выполнении операций

кодирования и декодирования. Распределитель канальный (РК) формирует N импульсных последовательностей, где N – число каналов в системе передачи. Распределитель цикловой (РЦ) формирует S импульсных последовательностей, где S – число циклов в сверхцикле. Выделитель тактовой частоты (ВТЧ) устанавливается на приемном конце ЦСП и выделяет тактовую частоту из принимаемого сигнала, с тем чтобы обеспечить равенство управляющих импульсных последовательностей на передаче и приеме, то есть обеспечить синхронный режим работы генераторного оборудования на приеме и передаче.
Определим частоты на выходе делителей для системы ИКМ-30, если тактовая частота равна fт = 2048 кГц. Тогда:
fр = fт / m = 2048 / 8 = 256 кГц;
fк = fр / (N+ Nд) = 256 / 32 = 8 кГц;
fсц = fк / S = 8 / 16 = 0,5 кГц.
Далее представлены диаграммы работы ГО.(Рисунок 5.5).




Уменьшим масштаб.



ДК управляется последовательностью импульсов с выхода 1 блока ДР. Уменьшим масштаб рисунка, чтобы изобразить импульсы на выходах Ц1...Ц15.

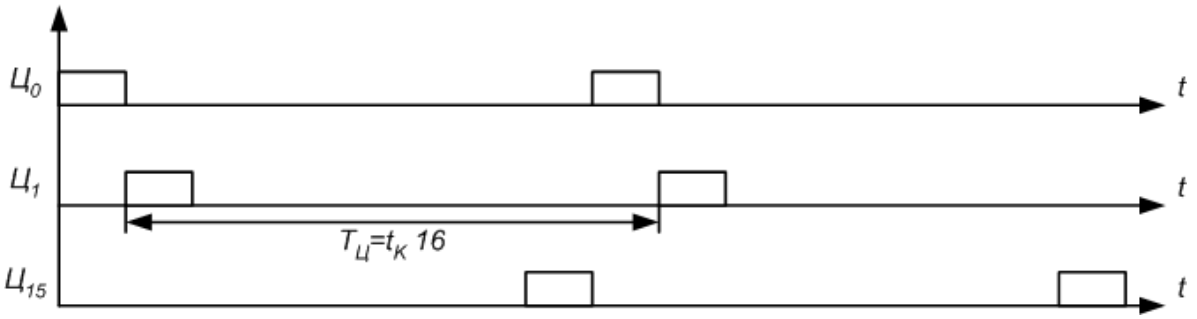



Рисунок 5.5- Диаграммы работы ГО

Для обеспечения равенства скоростей обработки сигналов, правильного декодирования кодовых групп и распределения группового сигнала по соответствующим приемникам каналов применяются следующие виды синхронизации:

- тактовая синхронизация обеспечивает равенство скоростей обработки сигналов передающих, приемных и промежуточных станций;
- цикловая синхронизация обеспечивает правильное декодирование кодовых групп и правильное распределение группового АИМ-сигнала между соответствующими приемниками;
- сверхцикловая синхронизация обеспечивает правильное распределение сигналов СУВ на приеме.

*Тактовая синхронизация* обеспечивает равенство скорости обработки сигналов на приемных и передающих оконечных станциях. Тактовая частота выделяется из спектра принимаемого цифрового сигнала при помощи выделителей тактовой частоты (ВТЧ). Это обеспечивает полное совпадение частот импульсных последовательностей на приеме и на передаче.

К устройствам тактовой синхронизации (УТС) предъявляются следующие требования:

Высокая точность подстройки частоты и фазы управляющего сигнала в приемной части оборудования.

Малое время вхождения в синхронизм.

Сохранение синхронизации при кратковременных перерывах связи.

*Цикловая синхронизация.* Циклом передачи называется совокупность сигналов, передаваемых за период дискретизации ($F_Д = F_ц$). для правильного декодирования и распределения канальных сигналов необходимо точно определить во времени начало каждого цикла и начала каждой кодовой группы в цикле. Это достигается с помощью цикловой синхронизации для работы, которой в состав каждого цикла вводиться специальный синхросигнал. Цикловой синхросигнал (ЦСС) должен отличаться от информационной кодовой группы.

*Отличие синхросигнала*. Цикловой синхросигнал имеет постоянную частоту повторения, если вводиться в каждом цикле, то это частота цикла.

Цикловой синхросигнал имеет постоянную структуру. Например для ИКМ-30 он имеет вид: 0011011. После включения системы передачи проходит какое-то время пока аппаратура передачи и приема не начнет работать синхронно. Этот интервал называется временем вхождения в синхронизм. Под воздействием помехи возможен сбой синхронизации и происходит поиск синхронизации. Допустимое время поиска синхронизма ограничено временем нарушения работы системы СУВ (сигналов управления и взаимодействия), при котором может произойти разъединения абонентов ГТС. Это время не должно превышать нескольких миллисекунд.

Система цикловой синхронизации содержит приемник и передатчик синхросигнала. Передатчик формирует в передающей части кодовую группу определенной структуры, расположенную в начале цикла передачи. В приемнике осуществляется опознавание кодовых групп, структура которых совпадает со структурой синхросигнала, и вырабатывается информация о принадлежности опознанных кодовых групп предаваемому синхросигналу.

***Формирование группового сигнала***

Групповой сигнал (цикл передачи) объединяет 32 канальных интервала. 30 для передачи полезной информации и 2 для передачи служебных сигналов. Служебные сигналы (ЦС, СЦС, СУВ и т.д.) передаются в нулевом и 16-том канальном интервалах (Рисунок 5.6).

Период дискретизации СУВ намного превышает период дискретизации сигналов телефонных каналов. Это позволяет в первом цикле передать СУВ первого и пятнадцатого каналов, во втором – второго и 16-го каналов и т.д. Поэтому каждые 16 циклов объединяются в сверхцикл. В нулевом цикле передается сигнал сверхцикловой синхронизации.

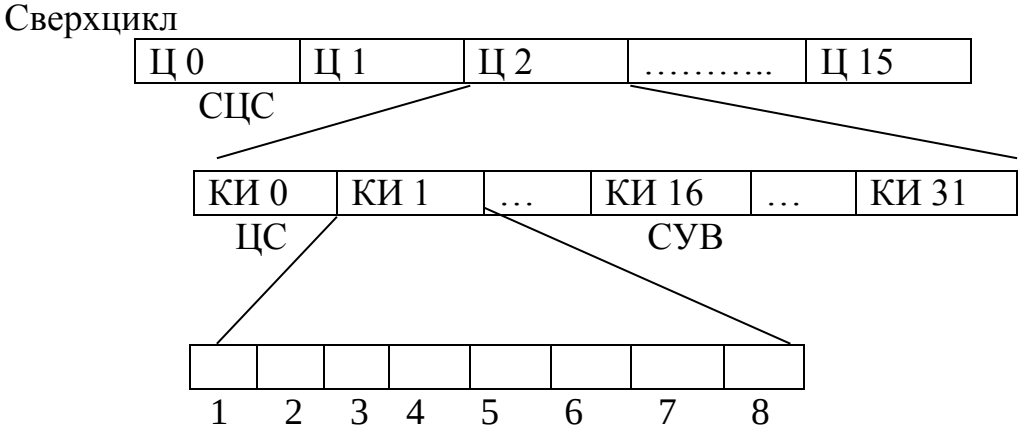



Рисунок 5.6 – Формирование группового сигнала ЦСП

**Лекция №6. Линейный тракт ЦСП**

*Цель лекции: ознакомиться с линейным трактом МСП и линейными кодами*

**Цифровой линейный тракт (ЦЛТ)** – это совокупность устройств, обеспечивающий формирование линейного ИКМ сигнала, его передачу и прием. Цифровой линейный тракт как тракт системы передачи должен содержать среду распространения цифрового сигнала и устройства, обеспечивающие требуемое качество передачи. На рисунке 6.1 приведена структурная схема ЦЛТ.

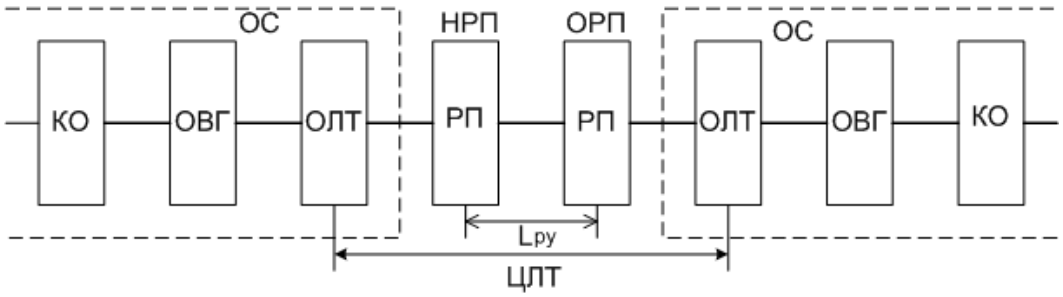



Рисунок 6.1 – Структурная схема ЦЛТ

*КО – каналообразующее оборудование*
ОВГ – оборудование временного группообразования
ОЛТ – оборудование линейного тракта
РП – регенерационные пункты
ОС – оконечная станция
НРП – необслуживаемый регенерационный пункт
ОРП - обслуживаемый регенерационный пункт

После получения группового сигнала на выходе ОВГ его необходимо передать по линии связи. Групповой сигнал при этом представляет собой однополярную двухуровневую последовательность импульсов. Спектр данной последовательности содержит дискретную и непрерывную составляющие. При этом 90% энергии содержится в первом лепестке.

Так как на входе и выходе линейных устройств стоят трансформаторы, которые не пропускают постоянной составляющей и низкие частоты, то спектр сигнала будет ограничен снизу, что вызовет размывание импульсов, и как следствие, взаимное влияние соседних импульсов - межсимвольные помехи второго рода (рисунок 6.2б). Полоса частот линейного тракта также ограничена и сверху, так как затухание линии увеличивается с ростом частоты, что вызывает межсимвольные помехи 1-го рода (рисунок 6.2а)). Таким образом, однополярный двоичный цифровой сигнал (ДЦЛ)неприемлем для передачи по ЦЛТ. Исходя из вышесказанного, к линейным цифровым сигналам (ЛЦС) предъявляют следующие требования:

1.Энергетический спектр сигнала должен быть как можно уже, в нем должна отсутствовать постоянная составляющая, и ослаблены низкочастотные и высокочастотные составляющие.

Причем желательно, чтобы максимум спектра лежал в области низких частот, что позволяет увеличить длину участка регенерации, так как в области более высоких частот затухание кабеля увеличивается.
Чем уже полоса частот сигнала, тем уже полоса пропускания усилителя и следовательно меньше мощность собственных помех. Отсутствие постоянной составляющей устраняет межсимвольные помехи 2-го рода, а также позволяет использовать симметрирующие трансформаторы и обеспечивать дистанционное питание регенераторов постоянным током.(рисунок 6.1)

2. Наличие тактовой частоты в спектре. А если ее нет, то способ ее получения должен быть не сложный.

3.Наличие избыточности в ЛЦС, что позволяет обнаружить ошибки.

Еще одним недостатком двоичного цифрового сигнала является то, что при его передаче невозможно обнаружить ошибки. Исходя из этих требований, формируют ЛЦС.

В настоящее время наиболее распространенными являются следующие коды ЦЛС:

- биполярный код, называемый также квазитроичным кодом или кодом с чередованием полярности (ЧПИ). В данном коде осуществляется чередование импульсов положительной и отрицательной полярности при преобразовании единичных символов исходной двоичной последовательности, вне зависимости от количества нулей между ними (рисунок 6.2)

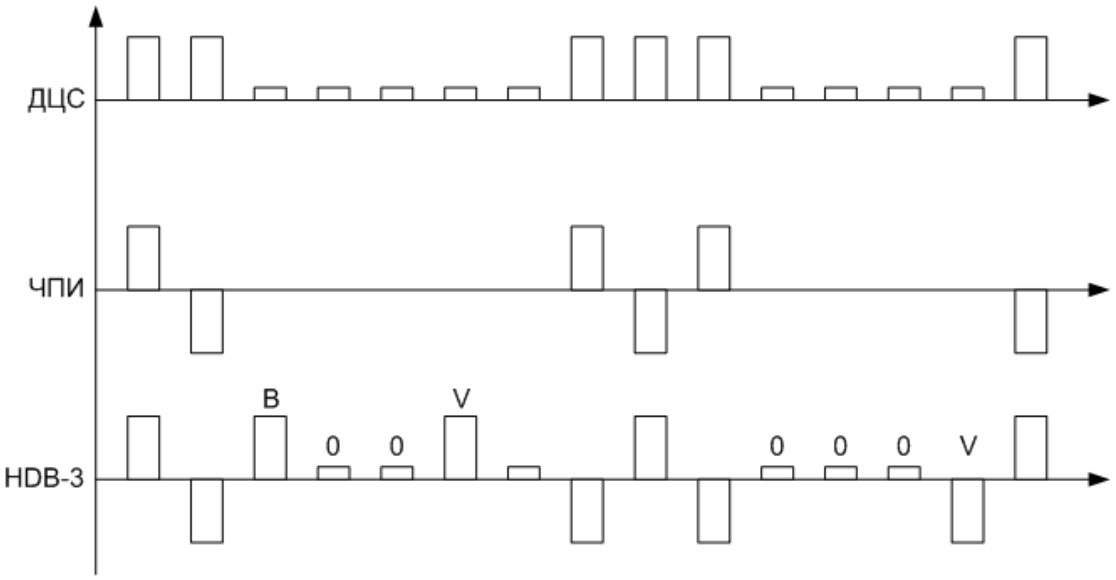



Рисунок 6.2 – Линейные коды

При этом в энергетическом спектре кода ЧПИ исключается постоянная составляющая (рисунок 6.3). В спектре отсутствует частота ft. Поэтому при выделении из сигнала тактовой частоты, необходимо преобразовать код ЧПИ в двоичный цифровой сигнал, спектр которого содержит тактовую частоту. Наличие чередования полярности позволяет легко обнаружить ошибки. Недостатком данного кода, является то, что длительные последовательности нулей приводят к сбою тактовой синхронизации. С целью устранения этого

недостатка было разработано несколько модификаций кода ЧПИ, наибольшее распространение среди них получил код HDB-3.

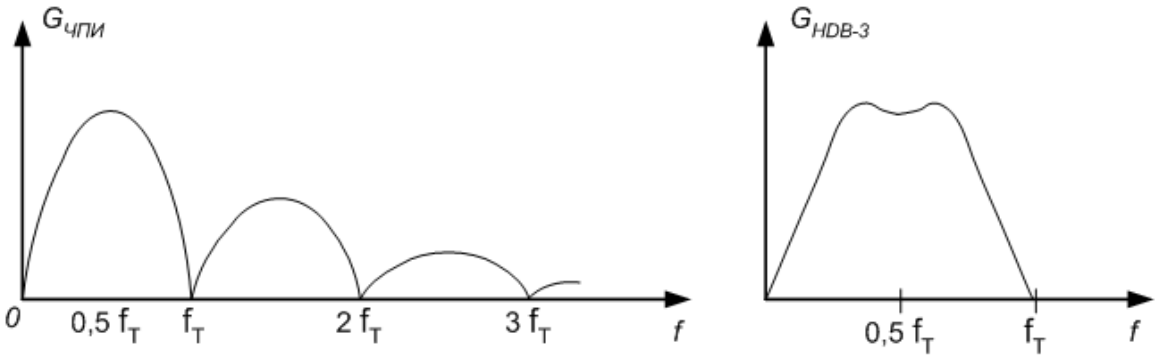



Рисунок 6.3 – Энергетические спектры кодов ЧПИ и HDB-3

-биполярный код с высокой плотностью единиц (HDB - 3 или КВП-3). В данном коде последовательность нулей заменяется вставкой, либо 000V - если, число единиц между двумя вставками четное, либо 000V - если, число единиц между двумя вставками нечетное. При этом символ В имеет полярность противоположную полярности предшествующей единицы, а символ V - полярность, такую же, как у предшествующей единицы (рисунок 40).

-биполярные коды понижающие тактовую частоту передаваемого сигнала. Например, это коды вида nBkM. Принцип данного кодирования в следующем: двоичная последовательность делится на группы по n символов, а затем каждая группа заменяется другой последовательностью из k символов. Если M = B - то двоичная последовательность; если M = T, то троичная последовательность; если M = Q, то четверичная последовательность и т.д.
Например, применяются коды 3B2T, т.е. три символа двоичной последовательности заменяются двумя символами троичной последовательности (рисунок 6.4).

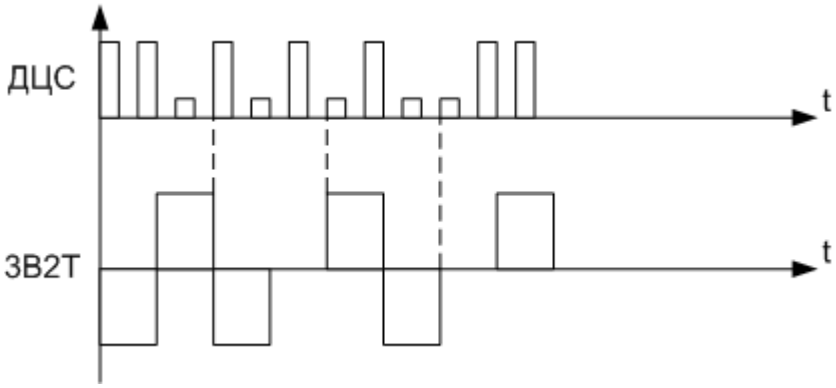



Рисунок 6.4 – Пример кода 3B2T

Таблица 6.1 Кодовая таблица

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| В | 1 1 0 | 1 0 1 | 0 1 1 | 0 1 0 |
| Т | -1 1 | -1 0 | 0 1 | 1 -1 |

Достоинство данных кодов в том, что:
1) можно понизить тактовую частоту в n/k раз;
2) можно сбалансировать сигнал за счет соответствующего построения кодовой таблицы; 3) исключить большие серии нулей.
Следует отметить, что межсимвольные помехи присущи не только двоичным цифровым сигналам, но и квазитроичным сигналам. На внутризоновых сетях, где используются симметричные кабели, присутствуют также помехи от линейных переходов.

## Лекция №7. Регенерация линейных сигналов

*Цель лекции: рассматривается схема линейного регенератора.*

Так как сигнал, проходя по линии связи, искажается, то его необходимо восстановить. Устройство, которое восстанавливает форму сигнала и усиливает его, называется регенератором. Регенераторы устанавливаются на НРП и ОРП в ЦЛТ. Упрощенная структурная схема регенератора для однополярных импульсов представлена на рисунке 7.1

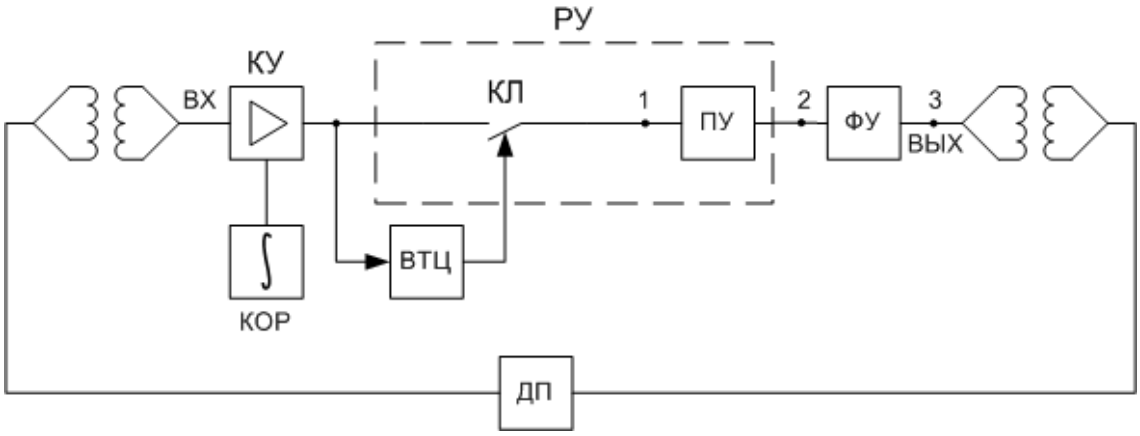



Рисунок 7.1 – Структурная схема регенератора

ДП - дистанционное питание;
КУ - корректирующий усилитель;
К - корректор;
ПУ - пороговое устройство;
ФУ - формирующее устройство;
КЛ- ключ
ВТЧ - выделитель тактовой частоты.

Сигнал, проходя по линии связи, искажается, при этом у него уменьшается амплитуда сигнала, и появляется длительное последействие.

Корректор корректирует форму импульсов, при этом на его выходе получаем импульсы колоколообразной формы. В момент наивысшей амплитуды колоколообразного импульса, срабатывает ключ (КЛ), причем частота срабатывания ключа равна тактовой частоте сигнала. ПУ сравнивает напряжение импульса сигнала с выхода ключа, с пороговым напряжением и принимает решение о том, что принято 0 или 1. С выхода ПУ сигнал поступает на ФУ, которое формирует импульсы заданной амплитуды и длительности. Временные диаграммы работы регенератора представлены на рисунке 1.6.18. Сформированный регенератором сигнал повторяет сигнал на входе цепи с некоторой ошибкой. Причиной ошибок является шум, под действием которого в ПУ может произойти ложная замена символа 0 на 1, или наоборот. Качество работы регенератора оценивается коэффициентом ошибок Кош, который определяется как отношение количества ошибочно принятых символов Nош к общему количеству символов $N^{\Sigma}$ , переданных за время измерения Тизм:

$$Кощ = Nош / N^{\Sigma}$$

Коэффициент ошибок, измеренный за большой отрезок времени называют вероятностью ошибки Рош. Чем больше участков регенерации, тем больше накапливается ошибок, следовательно, суммарная вероятность ошибки растет. Например, при одинаковых длинах регенерационных участков:

$$Рош\ ^{\Sigma} = n\ Рошi,$$

где n - число регенераторов.

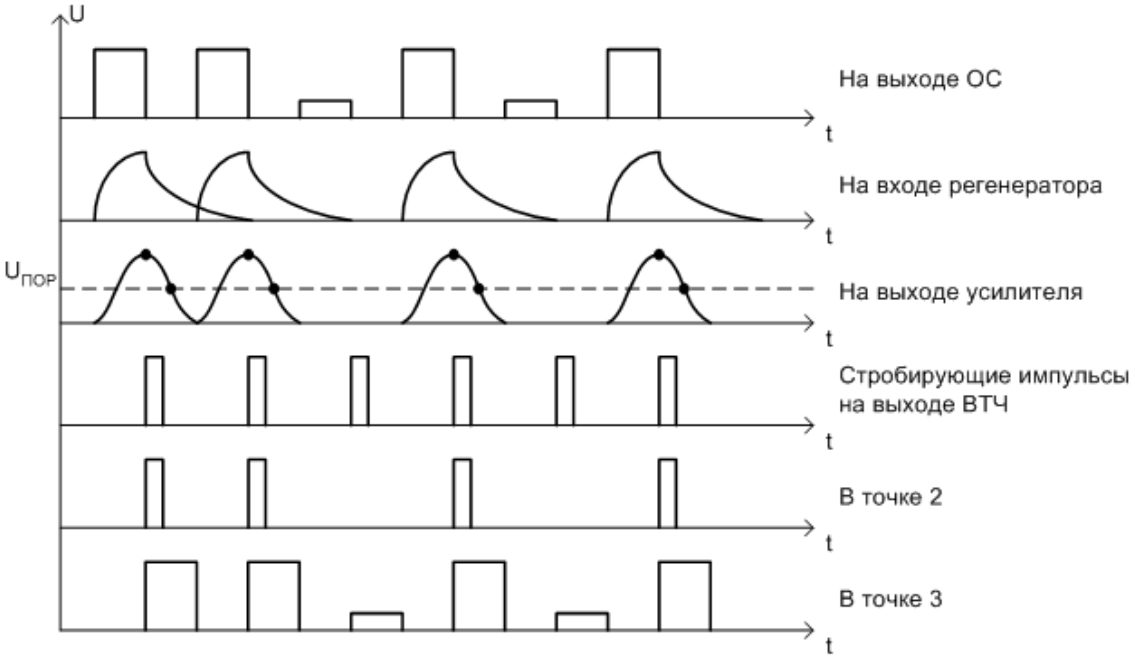



Рисунок 7.2 - Временные диаграммы

***Оборудование линейного тракта ЦСП.*** ОЛТ предназначено для организации линейных трактов, осуществление транзита и согласования

линейных трактов с оборудованием АЦО. Стойка обеспечивает дистанционное питание регенераторов, установленных на линии, регенерацию ИКМ сигнала, телеконтроль состояния линейных трактов, индикацию различных видов аварий и включение сигнализации, а также ведение служебных разговоров. Оборудование, расположенное на СОЛТ, позволит организовать до 30 линейных трактов и 6 каналов служебной связи, а также держать под контролем до 6 направлений работы линейных трактов.

Цифровой сигнал от АЦО поступает в тракт передачи через трансформатор и систему защиты, располагающиеся в блоке РС, и далее через вводную панель ВП в кабель. Ослабленный и искаженный сигнал с пристанционного участка проходит через ВП и станционный регенератор, восстанавливающий форму и временные соотношения в принимаемом цифровом сигнале. Система защиты тракта приема состоит из разрядника Р. Защита РС осуществляется в схеме регенератора. Восстановленный цифровой сигнал из блока РС поступает в приемную часть АЦО.

## Лекция №8. Иерархии ЦСП

*Цель лекции: рассматриваются методы объединения цифровых потоков. формирование группового потока, плезиохронная иерархия PDH*

Объединение цифровых потоков происходит при формировании группового цифрового сигнала из цифровых потоков систем более низкого порядка, а также при объединении различных сигналов, передаваемых в цифровом виде, в единый цифровой поток.

При формировании группового цифрового сигнала возможны следующие способы объединения цифровых потоков (мультиплексирования):

- посимвольный (поразрядный) — бит-интерливинг;
- поканальный (по кодовым группам каналов) — байт-интерливинг;
- посистемный (по циклам потоков объединяемых систем).

При посимвольном объединении импульсы цифровых сигналов объединяемых систем сужаются и распределяются во времени так, чтобы в освободившихся интервалах могли разместиться импульсы других систем.

Наиболее простым и широко применяемым является способ посимвольного объединения.(Рисунок 8.1.а)

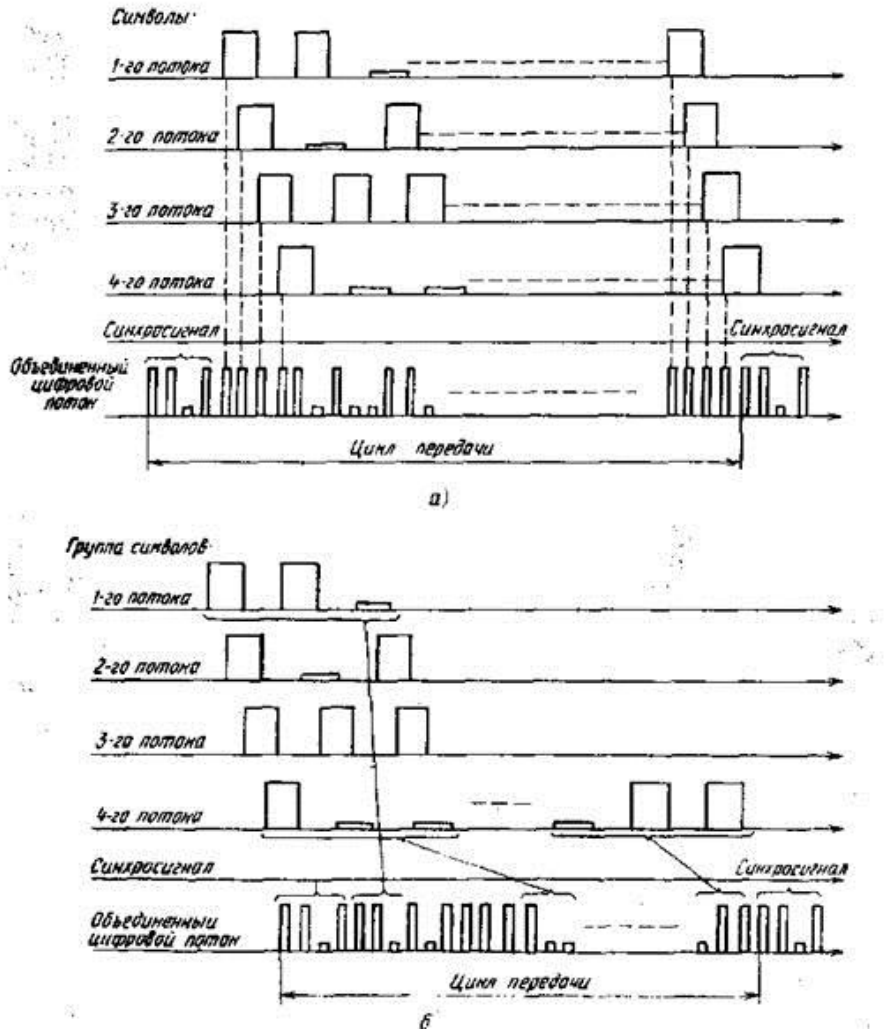



Рисунок 8.1 - Формирование группового цифрового сигнала различными способами объединения цифровых потоков: а — посимвольный; б — поканальный

Объединение цифровых потоков осуществляется в оборудовании временного группообразования (ОВГ), в его состав входят(рисунок 8.2):

- блоки цифрового сопряжения тракта передачи и приема $БЦС_{пер}$, $БЦС_{пр}$;
- устройства объединения УО в тракте передачи и разделения УР в тракте приема потоков;
- передатчик и приемник синхросигнала Пер. СС, Пр. СС;
- выделитель тактовой частоты ВТЧ линейного цифрового сигнала;
- генераторное оборудование ГО передающей и приемной станции.

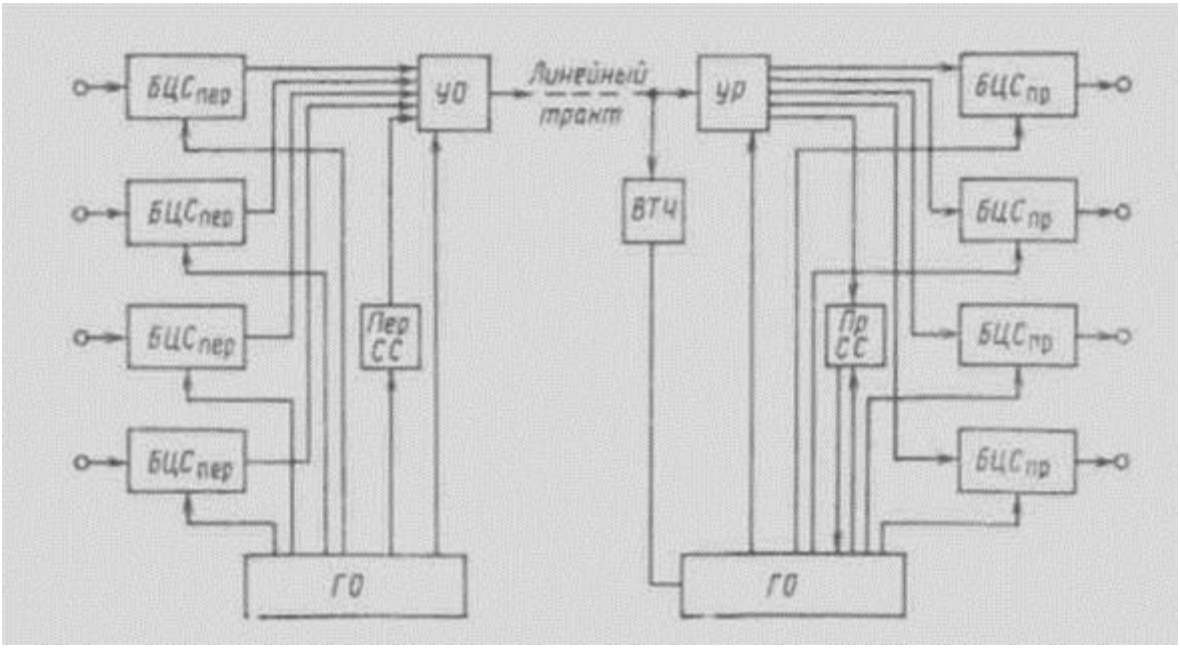



Рисунок 8.2 - Принцип построения оборудования временного группообразования (ОВГ)

Основным элементом в БЦС является запоминающее устройство (ЗУ).

При синхронном объединении частота записи $f_з$ в ЗУ и частота считывания $f_{сч}$ информации из ЗУ будут постоянны и кратны, так как вырабатываются одним и тем же ГО. В данном случае между командами записи и считывания должен быть установлен временной сдвиг, чтобы считывание информации происходило после ее поступления в ЗУ.

$$f_З = f_{Сч}$$

При асинхронном объединении ГО ОВГ и ГО устройств формирования цифровых потоков низшего порядка работают независимо друг от друга, следовательно, возможно некоторое расхождение между частотами записи и считывания.

$$f_З \neq f_{Сч}$$

Если $f_З > f_{Сч}$, то ЗУ перегружается, и часть символов пропадает. Если $f_З < f_{Сч}$, то память ЗУ имеет свободные промежутки, т.е. появляются дополнительные временные позиции, которые в исходном потоке отсутствуют. Чтобы избежать этих нарушений, требуется обеспечить согласование скоростей.

При $f_З > fсч$ производится отрицательное выравнивание скоростей (отрицательный стаффинг): из считываемой последовательности изымается тактовый интервал, который передается по специальному каналу. На приеме этот тактовый интервал вводится на свое место.

При $f_З < fсч$ производится положительное выравнивание скоростей(положительный стаффинг): в считанную последовательность вводится дополнительный балластный тактовый интервал (на передаче), на приеме этот интервал изымают.

Системы, удовлетворяющие этим условиям, называются системами с односторонним согласованием скоростей (выравниванием, стаффингом).

Существуют системы с двусторонним согласованием скоростей, в них в зависимости от знака разности частот $f_3$ и fсч при возникновении неоднородности необходимо либо вводить в считанную последовательность дополнительный тактовый интервал, либо изымать его и передавать по дополнительному каналу.

***Цифровые системы передачи*** строятся согласно определенной иерархии: в качестве первичной была выбрана скорость передачи 2048 кбит/сек. Это 30-канальная группа (32 канальных интервала). ОЦК имеет скорость передачи 64 кбит/сек. Разрядность кодовой группы выбрана равной 8. Тогда скорость передачи первичного цифрового потока составляет:

$$64*10^3 * 32 = 2048 \text{ кбит/сек}$$

Для дальнейшего увеличения скорости потоков принят коэффициент кратности, равный 4. Это объясняется тем, что в основе построения ЦСП лежит двоичная система исчисления.

Формирование ЦСП осуществляется на основе объединения цифровых потоков низшего порядка в цифровые потоки высшего порядка.

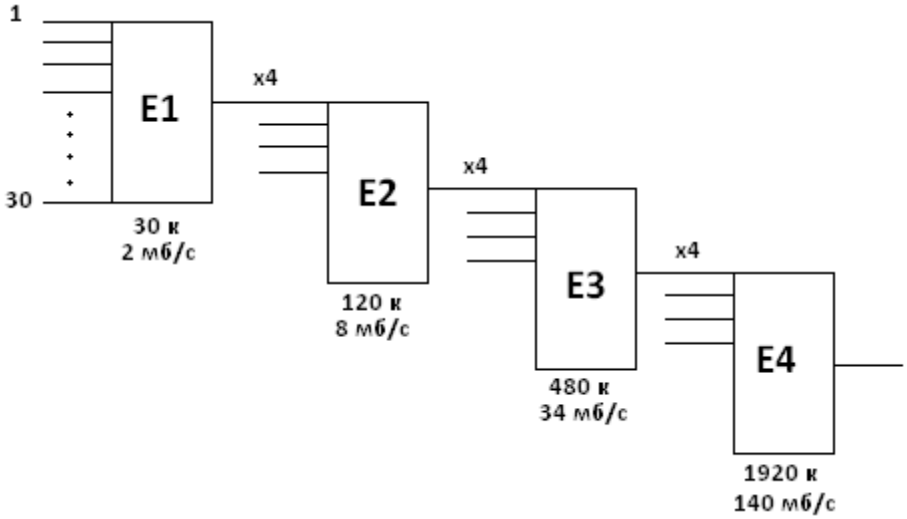



Рисунок 8.3 – Европейская иерархия скоростей

Современная первичная цепь может строиться на основе трех технологий:
PDH – плезиохронная цифровая иерархия Plesiochronous Digital Hierarchy;
SDH – синхронная цифровая иерархия Synchronous Digital Hierarchy,
(SONET - это североамериканский эквивалент SDH.);
ATM – асинхронный режим передачи.

В мировой практике существует 3 принципа формирования первичной сети (3 стандарта скоростей PDH):

- североамериканский (США, Канада);
- японский;
- европейский и южноамериканский.

На рисунке 8.4знаком E обозначены потоки европейской иерархии скоростей.

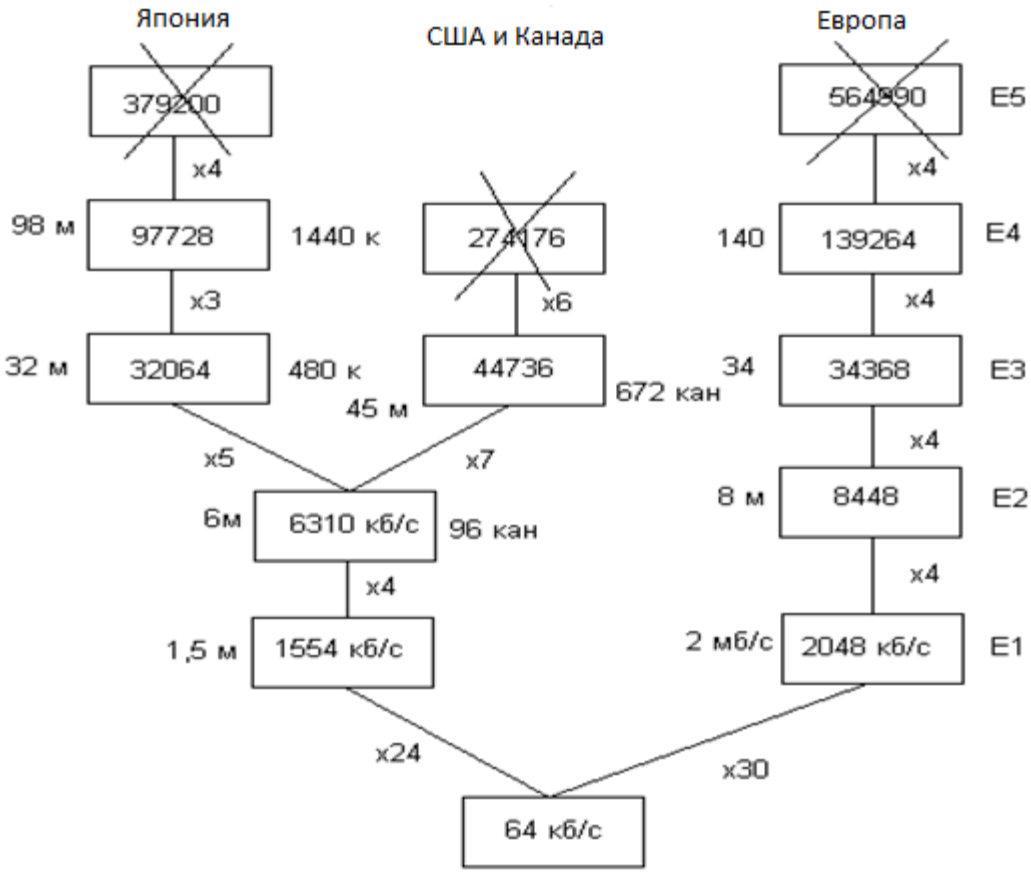



Рисунок 8.4 - Стандарты скоростей PDH

На рисунке 8.4 например 6м - это 6Мбит/сек. Степень мультиплексирования обозначается знаком х.

Генераторное оборудование каждой ступени иерархии работает независимо, поэтому для синхронизации оборудования необходимо вводить специальные синхросигналы, которые позволяют на приеме правильно распределять потоки низшего уровня.

Технология PDH обладает рядом недостатков:

- сложный ввод/вывод цифровых потоков в промежуточных пунктах;
- отсутствие средств сетевого автоматического контроля и управления;
- многоступенчатое восстановление синхронизма требует достаточно большого времени;
- наличие трех различных иерархий.

Сложность ввода/вывода потоков низшего порядка заключается в том, что при необходимости выделения потока Е1 из потока Е3 приходится проводить пошаговое демультиплексирование, а затем пошаговое мультиплексирование. Это объясняется тем, что добавление выравнивающих импульсов команд согласования скоростей делает невозможным вывод потока 2Мбит/с или ОЦК 64 кбит/с из потока Е4 со скоростью 140 Мбит/с. (Рисунок 8.5).

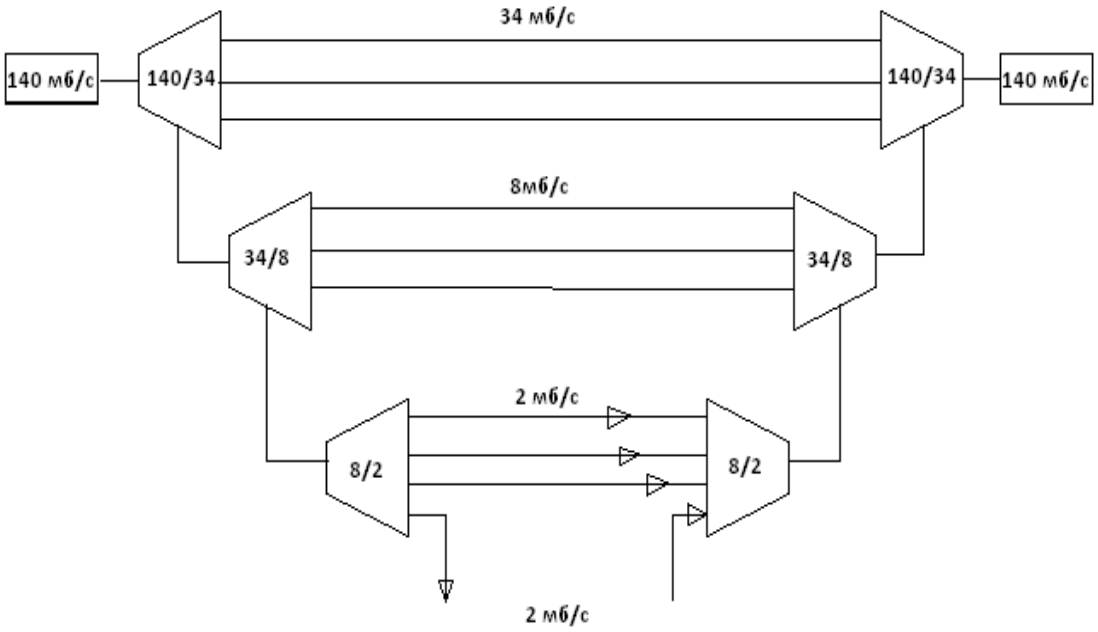



Рисунок 8.5 - Выделение потока E1 из потока E4

Объем оборудования пункта выделения равен объему оборудования двух оконечных станций.

**Лекция №9. Современные технологии**

*Цель лекции:* изучение основных особенности синхронной цифровой иерархией (SDH).

***Цифровая иерархия SDH*** – это способ мультиплексирования различных цифровых данных в единый блок, называемый синхронным транспортным модулем (STM), с целью передачи этого модуля по линии связи. Упрощённая структура STM показана на рисунке 9.1:

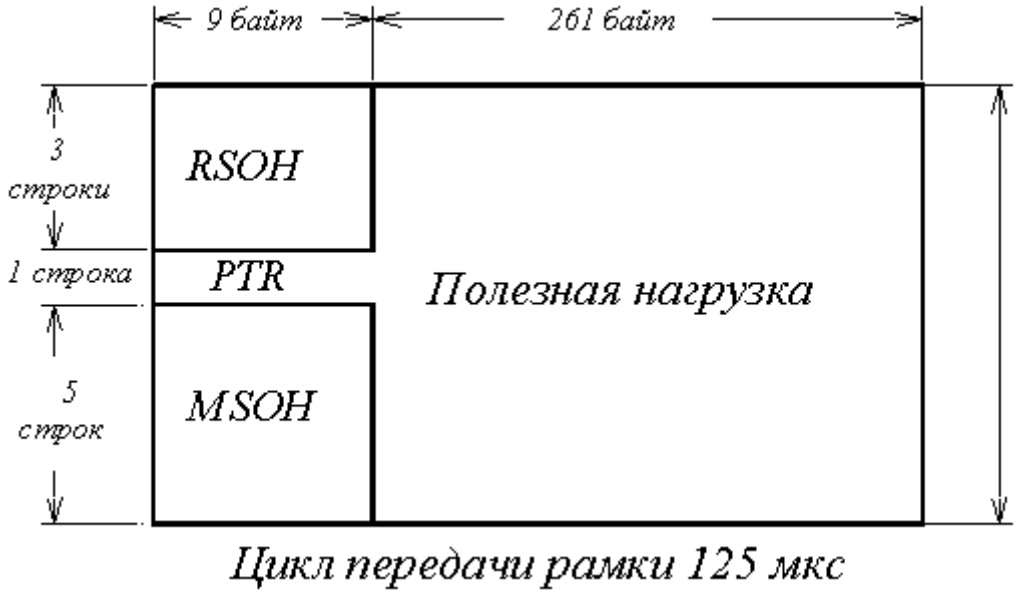



Рисунок 9.1 – Структура синхронного транспортного модуля STM-1

Модуль представляет собой фрейм (рамку) 9·270 = 2430 байт. Кроме передаваемой информации (называемой в литературе полезной нагрузкой), он содержит в 4-й строке указатель (Pointer, PTR), определяющий начало записи полезной нагрузки. Чтобы определить маршрут транспортного модуля, в левой части рамки записывается секционный заголовок (Section Over Head – SOH). Нижние 5·9 = 45 байтов (после указателя) отвечают за доставку информации в то место сети, к тому мультиплексору, где этот транспортный модуль будет переформировываться. Данная часть заголовка так и называется: секционный заголовок мультиплексора (MSOH). Верхние 3·9 = 27 байтов (до указателя) представляют собой секционный заголовок регенератора (RSOH), где будут осуществляться восстановление потока, "поврежденного" помехами, и исправление ошибок в нем.

Один цикл передачи включает в себя считывание в линию такой прямоугольной таблицы. Порядок передачи байтов – слева направо, сверху вниз (так же, как при чтении текста на странице). Продолжительность цикла передачи STM-1 составляет 125 мкс, т.е. он повторяется с частотой 8 кГц. Каждая клеточка соответствует скорости передачи 8 бит · 8 кГц = 64 кбит/с. Значит, если тратить на передачу в линию каждой прямоугольной рамки 125 мкс, то за секунду в линию будет передано 9·270·64 Кбит/с = 155520 Кбит/с, т.е. 155 Мбит/с.

***Формирование модуля STM-1***. В сети SDH применены принципы контейнерных перевозок. Подлежащие транспортировке сигналы предварительно размещаются в стандартных контейнерах (Container – C). Все операции с контейнерами производятся независимо от их содержания, чем и достигается прозрачность сети SDH, т.е. способность транспортировать различные сигналы, в частности, сигналы PDH. Наиболее близким по скорости к первому уровню иерархии SDH (155,520 Мбит/с) является цифровой поток со скоростью 139,264 Мбит/с, образуемый на выходе аппаратуры плезиохронной цифровой иерархии ИКМ-1920. Его проще всего разместить в модуле STM-1. Для этого поступающий цифровой сигнал сначала "упаковывают" в контейнер (т.е. размещают на определенных позициях его цикла), который обозначается C-4. Рамка контейнера C-4 содержит 9 строк и 260 однобайтовых столбцов. Добавлением слева еще одного столбца – маршрутного или трактового заголовка (Path Over Head – POH) – этот контейнер преобразуется в виртуальный контейнер VC-4.

Наконец, чтобы поместить виртуальный контейнер VC-4 в модуль STM-1, его снабжают указателем (PTR), образуя таким образом административный блок AU-4 (Administrative Unit), а последний помещают непосредственно в модуль STM-1 вместе с секционным заголовком SOH (рисунок 9.2).

Синхронный транспортный модуль STM-1 можно загрузить и плезиохронными потоками со скоростями 2,048 Мбит/с. Такие потоки формируются аппаратурой ИКМ-30, они широко распространены в современных сетях. Для первоначальной "упаковки" используется контейнер C12. Цифровой сигнал размещается на определенных позициях этого контейнера. Путем добавления маршрутного, или транспортного, заголовка

(РОН) образуется виртуальный контейнер VC-12. Виртуальные контейнеры формируются и расформировываются в точках окончаниях трактов.

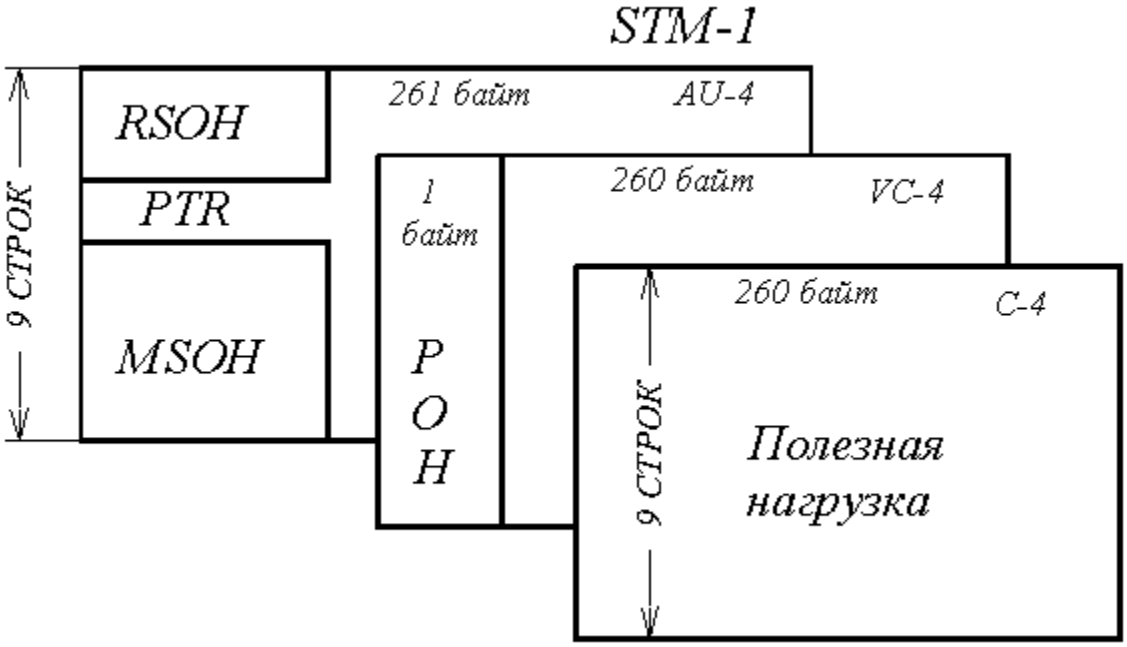



Рисунок 9.2 – Размещение контейнеров в модуле STM-1

В модуле STM-1 можно разместить 63 виртуальных контейнера VC-12. При этом поступают следующим образом. Виртуальный контейнер VC-12 снабжают указателем (PTR) и образуют тем самым транспортный блок TU-12 (Tributary Unit). Теперь цифровые потоки разных транспортных блоков можно объединять в цифровой поток 155,520 Мбит/с (рисунок 5.18). Сначала три транспортных блока TU-12 путем мультиплексирования объединяют в группу транспортных блоков TUG-2 (Tributary Unit Group), затем семь групп TUG-2 мультиплексируют в группы транспортных блоков TUG-3, а три группы TUG-3 объединяют вместе и помещают в виртуальный контейнер VC-4. Далее путь преобразований известен.

На рисунке 9.3 показан также способ размещения в STM-N, N=1,4,16 различных цифровых потоков от аппаратуры плезиохронной цифровой иерархии. Плезиохронные цифровые потоки всех уровней размещаются в контейнерах С с использованием процедуры выравнивания скоростей (положительного, отрицательного и двухстороннего).

Наличие большого числа указателей (PTR) позволяет совершенно четко определить местонахождение в модуле STM-N любого цифрового потока со скоростями 2,048; 34,368 и 139,264 Мбит/с. Выпускаемые промышленностью мультиплексоры ввода-вывода (Add/Drop Multiplexer – ADM) позволяют ответвлять и добавлять любые цифровые потоки.

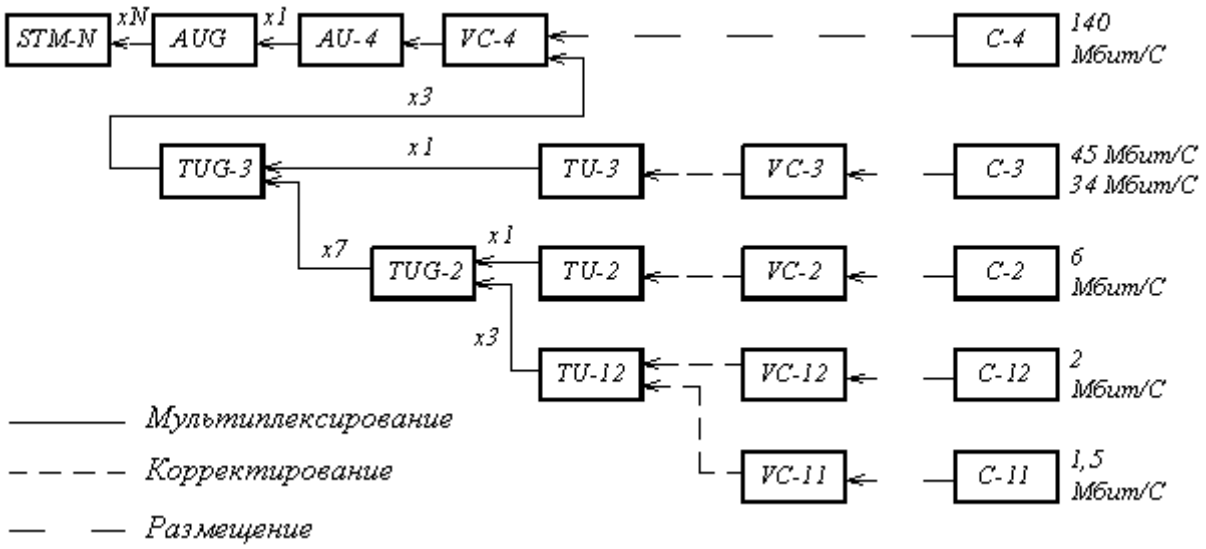



Рисунок 9.3 – Ввод плезиохронных цифровых потоков в синхронный транспортный модуль STM-N

Важной особенностью аппаратуры SDH является то, что в трактовых и сетевых заголовках помимо маршрутной информации создается много информации, позволяющей обеспечить наблюдение и управление всей сетью в целом, осуществлять дистанционные переключения в мультиплексорах по требованию клиентов, осуществлять контроль и диагностику, своевременно обнаруживать и устранять неисправности, реализовать эффективную эксплуатацию сети и сохранить высокое качество предоставляемых услуг.

Основным отличием системы SDH от системы PDH является переход на новый принцип мультиплексирования. В системе SDH производится синхронное мультиплексирование/демультиплексирование, которое позволяет организовывать непосредственный доступ к каналам PDH, которые передаются в сети SDH. На рисунке 5.2 показаны КМ-коммутационный модуль, ИГ-интерфейсные группы

Для создания более мощных цифровых потоков в SDH-системах формируется следующая скоростная иерархия (таблица 5.4): 4 модуля STM-1 объединяются путем побайтного мультиплексирования в модуль STM-4, передаваемый со скоростью 622,080 Мбит/с; затем 4 модуля STM-4 объединяются в модуль STM-16 со скоростью передачи 2488,320 Мбит/с; наконец 4 модуля STM-16 могут быть объединены в высокоскоростной модуль STM-64 (9953,280 Мбит/с).

На рисунке 9.4 показано формирование модуля STM-16. Сначала каждые 4 модуля STM-1 с помощью мультиплексоров с четырьмя входами объединяются в модуль STM-4, затем четыре модуля STM-4 мультиплексируются таким же четырёхвходовым мультиплексором в модуль STM-16. Однако существует мультиплексор на 16 входов, с помощью которого можно одновременно объединить 16 модулей STM-1 в один модуль STM-16.

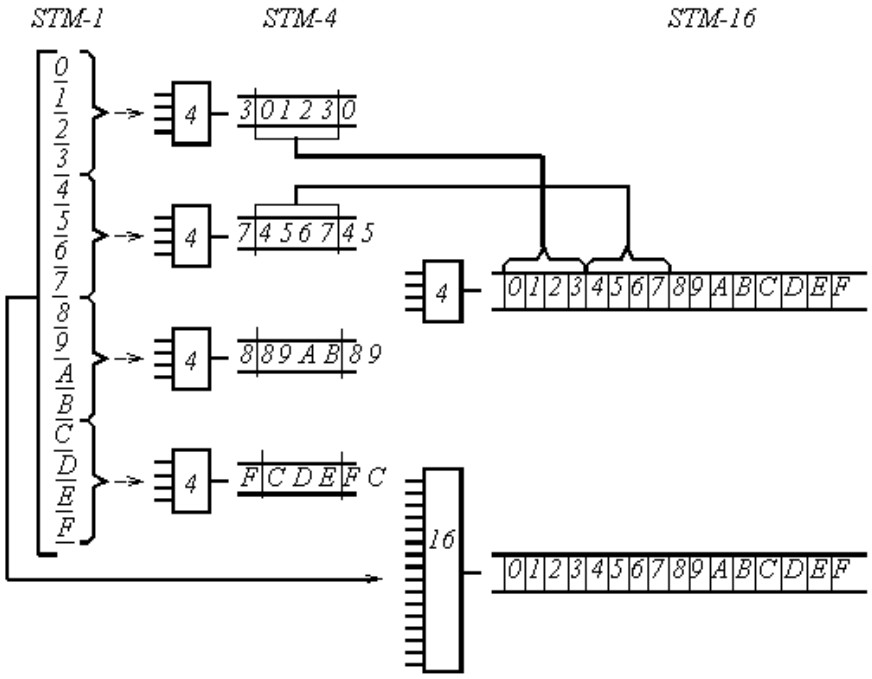



Рисунок 9.4– Формирование синхронного транспортного модуля STM–16

В таблице 9.1приведены скорости передачи SDH.

Таблица 9.1 Скорости передачи SDH

| Уровень SDH | Скорость передачи |
|---|---|
| STM-1 | 155,520 Мбит/с |
| STM-4 | 622,080 Мбит/с |
| STM-8 | 1244,160 Мбит/с |
| STM-12 | 1866,240 Мбит/с |
| STM-16 | 2488,320 Мбит/с (2,5 Гбит/с) |
| STM-64 | 9953,280 Мбит/с (10 Гбит/с) |
| STM-256 | 39813,120 Мбит/с (40 Гбит/с) |

Линейная скорость более высокого уровня STM-N сигнала равна произведению Nx155,52 Мбит/с.

***Синхронизация.*** Оборудование SDH, как и любые цифровые устройства, имеет встроенные источники тактовых импульсов (часы), к которым «привязаны» рабочие циклы его подсистем. Если в сети часы различных устройств работают не синхронно (различаются длительность и фазы тактовых импульсов), то это может приводить к «проскальзыванию» битов принимаемых потоков, а при мультиплексировании этих сигналов, для их выравнивания, необходимо осуществлять процедуры вставки или изъятия бит (что, как отмечалось выше, и делается в PDH).

При объединении сетей различных операторов связи, остро встает проблема глобальной синхронизации узлов, и этот момент нельзя недооценивать.

В SDH, где приняты синхронные схемы мультиплексирования, исключающие возможность вставки/изъятия бит, задача синхронизации узлов в сети выходит на первый план. Общие принципы синхронизации сетей SDH определены в рекомендациях ITU-T G.811, G.812, G.813.

Согласно этим рекомендациям элементы сети должна быть синхронизованы от центральных часов, называемых первичными эталонными часами (PRC - Primary Reference Clock), генерирующими 2048 КГц сигнал с точностью $10^{-11}$. Этот сигнал должен быть распределен по сети. Для этого используется иерархическая структура: сигнал синхронизации транслируется устройствами поддержки синхронизации (SSU- Synchronization Supply Units) и часами оборудования SDH (SEC- SDH Equipment Clock). Тактовый сигнал, регенерируемый SSU и SEC, подстраивается по фазе и частоте к сигналу синхронизации, приходящему на специальный порт или выделяемому из агрегатного или трибутарного потока.

При раздаче синхронизации в сети необходимо соблюдать определенные правила:

- узлы сети должны получать сигнал синхронизации только от устройств, которые содержат часы такого же или более высокого качества;
- наиболее надежное оборудование (с наименьшей вероятностью отказов) должно выбираться в качестве синхронизирующего оборудования;
- общее количество сетевых элементов в последовательности от PRC должно быть минимизировано (не более 10 SSU и не более 60 SEC);
- нельзя допускать формирования замкнутых петель, например, когда узел А получает синхронизацию от В, В- от С, С- от А.

В сетях SDH предусмотрены механизмы, по возможности, предотвращающие потерю синхронизации элементами сети. Если в результате аварии сетевое устройство перестает получать сигнал синхронизации, то оно переключается на другой источник временных сигналов с более низким приоритетом. Если это невозможно, то устройство переходит в режим удержания (hold-over mode). В этом режиме часы устройства корректируются в соответствии с данными о корректировках, сохраненными за предыдущее время работы, с поправкой на колебания температуры. Сообщения о состоянии синхронизации SSM (Synchronization Status Messages) элемента сети передаются в байте S1 секционного заголовка его соседям.

Отдельная проблема- стыковка между сетями с независимыми источниками синхронизации. Если расхождения часов находятся в определенных пределах, то в SDH сети эта проблема решается с использованием указателей.

***Управление сетями SDH.*** Рассматривая базовые функциональные блоки сетей SDH, мы не упомянули еще один важный элемент синхронных сетей- систему управления. Все элементы сети SDH являются программно управляемыми. Возможность мониторинга работоспособности сети и удаленного конфигурирования узлов- одно из наиболее важных свойств SDH. Системы управления сетями SDH базируются на модели сети управления телекоммуникациями (TMN, Telecommunications Managemet Network.

Принципы TMN были изложены в 1989 г. в рекомендации M.3010 ITU-T. Функции TMN суммированы в выражении «Operation, administration, maintenance and provisioning» (управление, администрирование, обслуживание и обеспечение)- OAM&P, что, среди прочего, включает мониторинг работоспособности и контроль сообщений об ошибках. Схема TMN приведена на рисунке 9.5.

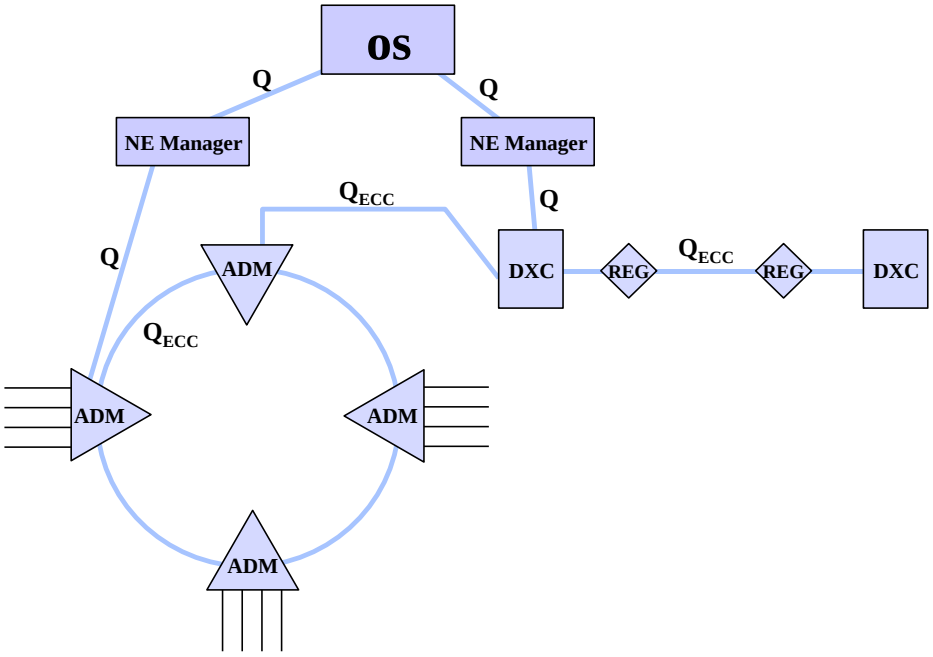



Рисунок 9.5- Схема TMN для сети SDH

## Лекция №10 Логическое построение оборудования SDH

*Цель лекции:* ознакомление с оборудованием SDH, топологией сетей SDH, резервированием сети SDH.

Сети SDH строятся из четырех типов функциональных модулей (сетевых элементов): регенераторы, терминальные мультиплексоры, мультиплексоры ввода/вывода и кросс-коннекторы.

Регенератор используется для увеличения допустимого расстояния между узлами сети путем восстановления входящих сигналов SDH. Это расстояние зависит от степени затухания сигнала в передающей среде и параметров приемо-передающего оборудования. Для одномодового оптического кабеля оно составляет 15-40 км для длины волны 1310 нм и 40-110 км для длины волны 1550 нм.

Терминальный мультиплексор (TM) предназначен для мультиплексирования и демультиплексирования сигналов PDH и STM (в терминологии SDH их называют трибутарными или компонентными интерфейсами) в агрегатный поток STM-N. Он также может осуществлять локальную коммутацию с одного трибутарного интерфейса на другой.

Мультиплексор ввода/вывода (ADM) имеет на входе те же наборы интерфейсов, что и ТМ, и, как правило, два агрегатных потока STM-N (условно называемых «восточный» и «западный»). В этих мультиплексорах плезиохронные или синхронные сигналы могут быть извлечены из или добавлены в поток STM-N, при этом часть полезной нагрузки сигнала STM-N проходит через устройство транзитом. Это дает возможность создавать самовосстанавливающиеся кольцевые структуры (SHR, Self Healing Ring), которые, в случае аварии, автоматически коммутируют потоки в обход поврежденных участков или элементов сети.

Кросс-коннектор (DXC)- распределительный узел сети, осуществляющий неблокируемые перекрестные соединения между любыми его портами (рисунок 10.1).

SDH кросс-коннекторы выполняют эти функции на уровне виртуальных контейнеров VC-n, для этого PDH сигналы отображаются на виртуальные контейнеры соответствующего уровня. Следует отметить, что возможность осуществления коммутации заложена, также и в SDH мультиплексоры.

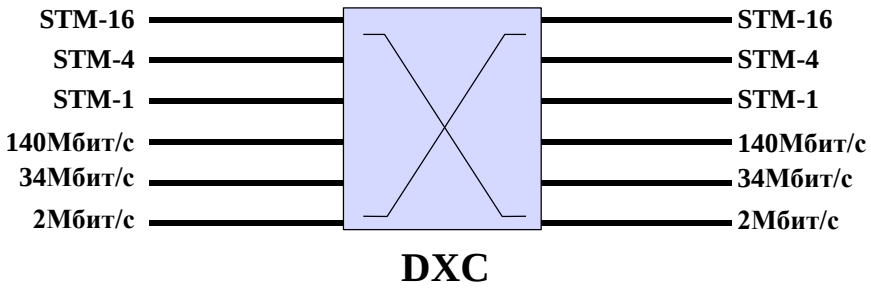



Рисунок 10.1- SDH кросс-коннектор

Основные функции, выполняемые сетевыми элементами SDH:

- маршрутизация виртуальных контейнеров, проводимая на основе использования информации в маршрутном заголовке POH соответствующего контейнера;
- консолидация или объединение виртуальных контейнеров;
- трансляция потока от точки к нескольким точкам (point-to-multi-point);
- сортировка или перегруппировка (grooming) виртуальных контейнеров, осуществляемая с целью создания нескольких упорядоченных, например, по типу переносимого сервиса, потоков;
- ввод/вывод виртуальных контейнеров.

Состав сети SDH. Сеть SDH, как и любая сеть, строиться из отдельных функциональных модулей ограниченного набора: мультиплексоров, коммутаторов, концентраторов, регенераторов и терминального оборудования. Этот набор определяется основными функциональными задачами, решаемыми сетью:

- сбор входных потоков через каналы доступа в агрегатный блок, пригодный для транспортировки в сети SDH- задача мультиплексирования, решаемая терминальными мультиплексорами ТМ сети доступа;

- транспортировка агрегатных блоков по сети с возможностью ввода/вывода входных/выходных потоков- задача транспортирования, решаемая мультиплексорами ввода/вывода ADM, логически управляющими информационным потоком в сети, а физически- потоком в физической среде, формирующей в этой сети транспортный канал;

- перегрузка виртуальных контейнеров в соответствии со схемой маршрутизации из одного сегмента сети в другой, осуществляемая в выделенных узлах сети- задача коммутации, или кросс-коммутации, решаемая с помощью цифровых коммутаторов или кросс-коммутаторов DXC;

- объединение нескольких однотипных потоков в распределитель-
ный узел- концентратор (хаб)- задача концентрации, решаемая концентраторами;

- восстановление (регенерация) формы и амплитуды сигнала, передаваемого на большие расстояния, для компенсации его затухания- задача регенерации, решаемая с помощью регенераторов- устройств, аналогичных повторителям в LAN;

- сопряжение сети пользователя с сетью SDH- задача сопряжения, решаемая с помощью оконечного оборудования- различных согласующих, устройств, например, конверторов интерфейсов, конверторов скоростей, конверторов импедансов и т.д.

Основным функциональным модулем сетей SDH является мультиплексор. Мультиплексоры SDH выполняют как функции собственно мультиплексора, так и функции устройств терминального доступа, позволяя подключать низкоскоростные каналы PDH иерархии непосредственно к своим входным портам. Они являются универсальными и гибкими устройствами, позволяющие решать практически все перечисленные выше задачи, т.е. кроме задачи мультиплексирования выполнять задачи коммутации, концентрации и регенерации. Это оказывается возможным в силу модульной конструкции SDH мультиплексора- SMUX, при которой выполняемые функции определяются лишь возможностями системы управления и составом модулей, включённых в спецификацию мультиплексора. Принято, однако, выделять два основных типа SDH мультиплексора: терминальный мультиплексор и мультиплексор ввода/ вывода.

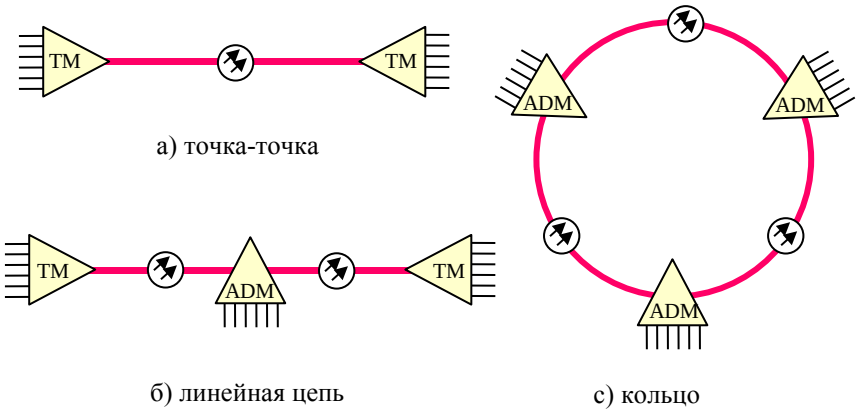
Терминальный мультиплексор ТМ является мультиплексором и оконечным устройством SDH сети с каналами доступа, соответствующим трибам доступа PDH и SDH иерархий. ТМ может либо вводить каналы (коммутировать их со входа трибного интерфейса на линейный вы-ход), или выводить (коммутировать с линейного входа на выход триб-ного интерфейса).

Мультиплексор ввода/вывода ADM может иметь на входе тот же набор трибов, что и терминальный мультиплексор. Он позволяет вводить/выводить соответствующие им каналы. Дополнительно к возможностям коммутации, обеспечиваемым ТМ, ADM позволяет осуществлять сквозную коммутацию

выходных потоков в обоих направлениях, а также осуществлять замыкание канала приёма на канал передачи на обоих сторонах («восточный» и «западный») в случае выхода из строя одного из направлений. Наконец, он позволяет (в случае аварийного выхода из строя мультиплексора) пропускать основной оптический поток мимо него в обходном режиме. Всё это даёт возможность использовать ADM в топологиях типа кольцо.

***Топология сетей SDH***. При построении сетей SDH одной из первых задач, которую необходимо решать, является задача выбора топологии (рисунок 10.2).

Основные конфигурации сетей SDH это: «точка-точка», «линейная цепь» и «кольцо», хотя применяются и другие топологии, например ячеистая.




а) точка-точка

б) линейная цепь

с) кольцо

Рисунок 10.2- Базовые топологии сетей SDH

Топология «точка-точка». Это простейшая топология, включающая два терминальных мультиплексора, соединенных оптической линией связи с или без регенератора. Каждый из мультиплексоров действует как концентратор трибутарных потоков Е1, Е3 и др. Эта топология широко используется при передаче больших потоков данных по высокоскоростным магистральным каналам. Она может быть реализована, как по схеме без резервирования канала, так и по схеме со 100 % резервированием типа 1+1, использующей основной и резервный агрегатные каналы.

Топология «последовательная линейная цепь». Эта топология используется тогда, когда существует необходимость ответвлений в ряде точек линии, где могут вводится и выводится каналы доступа. Реализуется она путем включения вдоль линии связи мультиплексоров ввода/вывода.

Топология «звезда». В этой топологии один из узлов сети (кросс-коннектор) играет роль концентратора, распределяя часть трафика по другим удаленным узлам, а оставшуюся часть на терминалы пользователей.

Топология «кольцо». Эта топология наиболее широко используется при построении SDH сетей первых двух уровней иерархии (STM-1 и STM-4). Строительными блоками этой архитектуры являются мультиплексоры ввода/вывода, которые соединяются в кольцо с однонаправленной либо двунаправленной передачей трафика.

Широкое использование кольцевой топологии обусловлено тем, что построенные на ее основе сети способны самостоятельно восстанавливаться после некоторых достаточно характерных типов отказов.

Рассмотрим два основных метода, используемых в SDH, для защиты соединений, проложенных через сеть. Это линейная защита и, так называемая, кольцевая защита.

Линейная защита. Простейшая форма реализации этой защиты- защита 1+1, используемая в соединениях «точка-точка», где на каждую рабочую линию отводится одна резервная. При обнаружении потери сигнала на рабочей линии, оборудование на обоих концах автоматически переключается на резервную. Более экономичный вариант- защита 1:N, используемый, в основном, на магистральных участках большой протяженности. В этом случае на несколько рабочих линий отводится одна резервная. Резервная линия может быть использована для передачи низкоприоритетного трафика, который просто прерывается, если необходимо подменить вышедшую из строя рабочую линию. Механизмы защиты 1+1 и 1:N стандартизированы ITU-T в рекомендации G.783.

Кольцевая защита. Топология «кольцо» допускает несколько механизмов защиты, которые описаны в Рекомендации G.841 ITU-T, и различаются для кольцевых структур с однонаправленными и двунаправленными соединениями. В однонаправленном кольце все данные передаются по одной оптической жиле в одном направлении. Вторая оптическая жила, с противоположным направлением передачи, рассматривается как резервная. В случае аварии на одном из сегментов кольца, передача в направлении поврежденного участка автоматически коммутируется на резервное кольцо (рисунок 10.3).

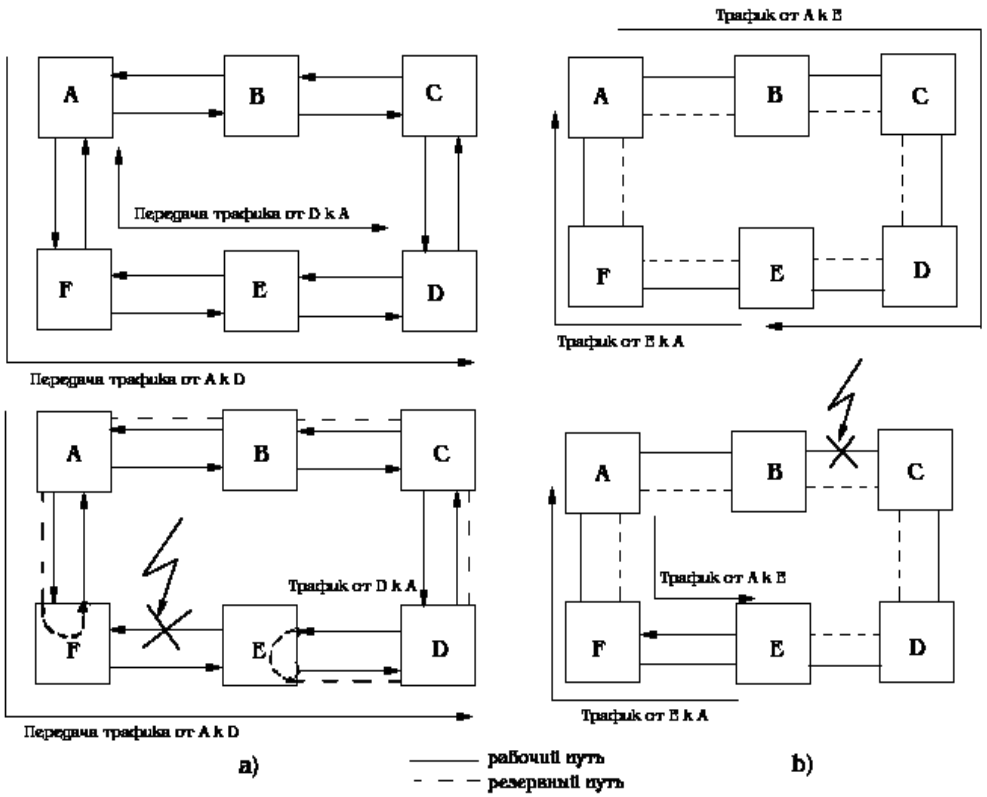



Рисунок 10.3- Схемы резервирования в системах SDH

Наибольшее распространение имеют две схемы, непосредственно связанные с кольцевой топологией сетей SDH- схема «горячего резервирования» (рисунок 1.9 а) и схема распределенной нагрузки (рисунок 1.9 б). В первом случае трафик передается как в прямом, так и в резервном направлении. В случае повреждения происходит реконфигурация и создается резервный канал. В схеме распределенной нагрузки половина графика передается в прямом, половина- в обратном направлении. В этом случае при возникновении неисправности происходит переключение на уровне ресурсов. Согласно рекомендации G.841 ITU-T время резервного переключения не должно превышать 50 мс.

Сравнивая технологию SDH с технологией PDH, можно выделить следующие особенности технологии SDH:

- предусматривает синхронную передачу и мультиплексирование. Элементы первичной сети SDH используют для синхронизации один задающий генератор, как следствие, вопросы построения систем синхронизации становятся особенно важными;
- предусматривает прямое мультиплексирование и демультиплексирование потоков PDH, так что на любом уровне иерархии SDH можно выделять загруженный поток PDH без процедуры пошагового демультиплексирования.

Процедура прямого мультиплексирования называемая также процедурой ввода-вывода:

- опирается на стандартные оптические и электрические интерфейсы, что обеспечивает лучшую совместимость оборудования различных фирм-производителей;
- позволяет объединить системы PDH европейской и американской иерархии;
- обеспечивает полную совместимость с существующими системами PDH и, в то же время, дает возможность будущего развития систем передачи, поскольку обеспечивает каналы высокой пропускной способности для передачи ATM, MAN, HDTV и т.д.;
- дает лучшее управление и самодиагностику первичной сети.

Большое количество сигналов о неисправностях, передаваемых по сети SDH, дает возможность построения систем управления на основе платформы TMN. Технология SDH обеспечивает возможность управления сколь угодно разветвленной первичной сетью из одного центра.

Все перечисленные преимущества обеспечили широкое применение технологии SDH для построения цифровой первичной сети.

## Лекция №11. Технологии NGSDH, WDM, DWDM

*Цель лекции:* ознакомление с теехнологями NGSDH, WDM и DWDM.

*Компоненты NG SDH*. Принято считать, что система SDH относится к новому поколению, если она включает поддержку следующих компонент:

- общая процедура разбиения на кадры (General Framing Procedure, GFP), которая обеспечивает адаптацию асинхронного трафика данных на основе кадров переменной длины к байт ориентированному трафику SDH с минимальными задержками и избыточностью заголовков; ITU-T G.7041;

- виртуальная конкатенация (Virtual Concatenation, VCAT) обеспечивает возможность объединения на логическом уровне нескольких контейнеров VC-12, VC-3 или VC-4 в один канал передачи данных. ITU-T G.707, G.783;

- схема регулировки емкости канала (Link Capacity Adjustment Scheme, LCAS) позволяет реализовать любые изменения пропускной способности без прекращения передачи данных. ITU-T G.7042.

***Протокольное решение GFP***. Технология GFP по определению МСЭ-Т обеспечит более эффективное использование ресурсов транспортных сетей для доставки данных нереального времени. Она находится в одном ряду с ATM, но поддерживает передачу кадров переменной емкости (рисунок 11.1).

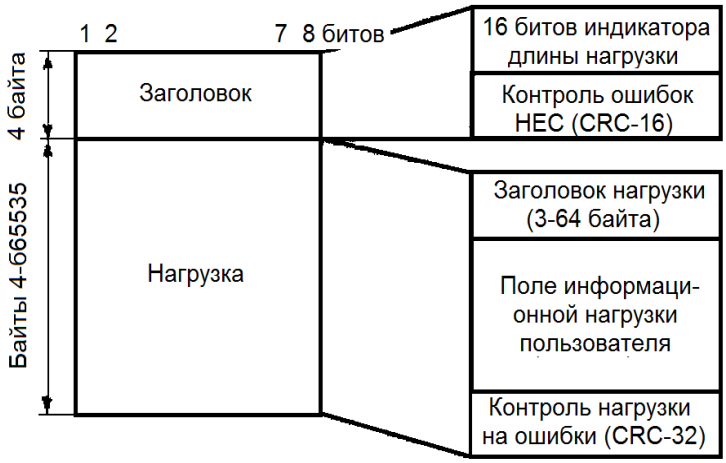



Рисунок 11.1– Формат кадра GFP

Формат кадра GFP может указывать на различное назначение:

- пользовательские с передачей трафика и управления в интересах пользователя;

- управление с кадрами технического обслуживания, управление и эксплуатация (OAM, Operation, Administration, Maintenance), т.е. скрытые от пользователя функции и свободные кадры.

Кроме того, кадр GFP предусмотрен для реализации двух возможностей передачи: прозрачной GFP-T (Transparented) и с отображением кадра пользователя GFP-F (Frame mapped).

Поле заголовка кадра GFP представлено четырьмя байтами. Поле индикатора длины протокольного пользовательского блока данных PLI (PDU Length Indicator) указывает число в двоичном коде, соответствующее объему пользовательской нагрузки. Минимальная величина этого поля — 4 байта.

Объем поля PLI составляет 16 битов.

Процессы формирования кадров GFP представлены на рисунке 11.2. Для индикации дефектных состояний тракта GFP используются сигналы:

- повреждение тракта TSF (Trail Signal Fail), который обнаруживается на уровне секций SDH или OTH;
- повреждение обслуживания — пропадания/ошибки сигнала сервера (SSF, Server Signal Failure), формируемый на уровне сборки и разборки кадра;
- повреждение сигнала пользователя CSF (Client Signal Fail) как результат образования одного из двух указанных выше сигналов.

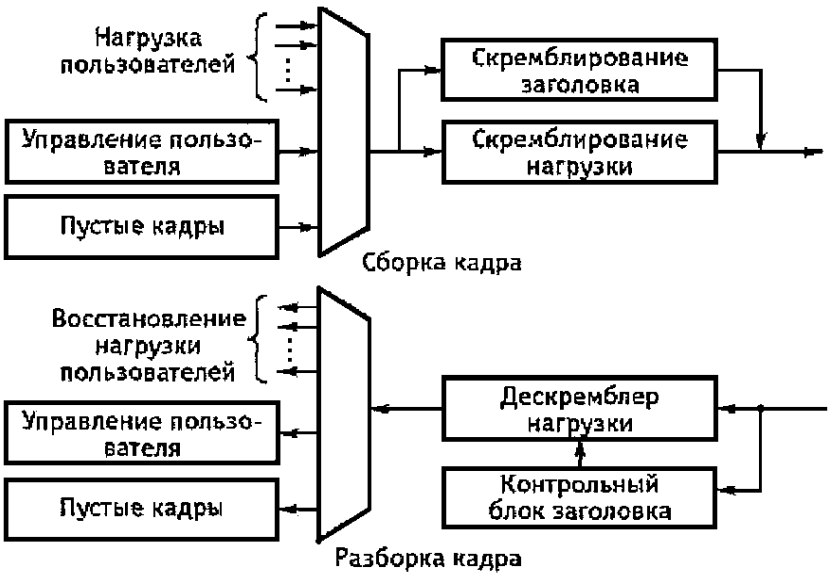



Рисунок 11.2 – Процессы формирования GFP

Кадры GFP подразделяются на два типа: GFP-F, GFP-T (рисунок 11.3). Кадры GFP-F применимы в большей степени к пакетам данных разного типа и разной длины. Кадры GFP-F предполагают кодирование для передачи сигналов в формате 8B10B. Примерами нагрузки GFP-F могут служить пакеты IP/PPP и кадры GbE.

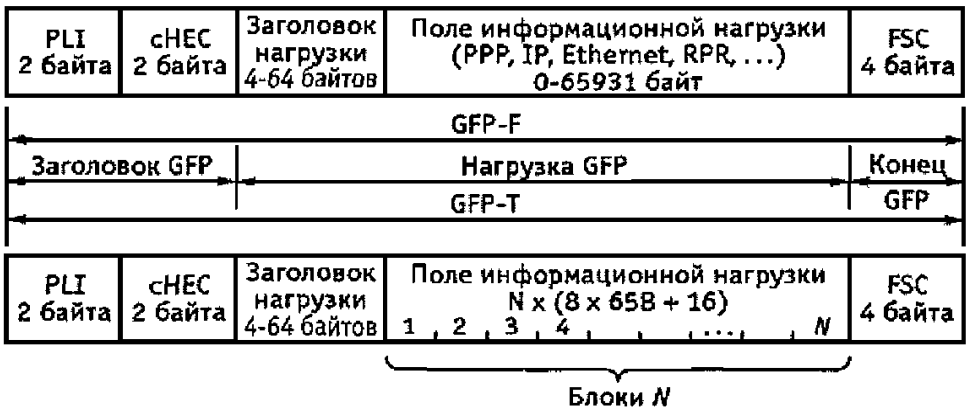



Рисунок 11.3 – Отличительные признаки GFP-F и GFP-T

Кадры GFP-T загружаются данными одного пользователя с эффективным суперблоковым преобразованием, где нагрузка представлена Л'хбУ-байтовыми суперблоками, где каждому 65-байтовому блоку придается код CRC-16. На рисунке 5.5 приводится содержимое нагрузки кадров GFP-F и GFP-T.

Для кодирования пользовательских данных в GFP-T применяется код 64B/65B, который преобразует данные из кода 8B10B. Нагрузка представлена в битовом измерении.

*Технологий семейства WDM* (Wavelength Division Multiplexing), то есть разделение по длинам волн.

Можно выделить три группы систем WDM: Coarse WDM (CWDM, грубый, или разреженный WDM), Dense WDM (DWDM, плотный WDM) и High Dense WDM (HDWDM, высокоплотный WDM). Каждая из них ориентирована на применение в магистральных сетях различного масштаба (от небольших, городских и региональных, до межрегиональных и трансконтинентальных).

Системы CWDM (системы с частотным разносом каналов не менее 200 ГГц) позволяют мультиплексировать не более 16 каналов. Системы DWDM (системы с частотным разносом каналов не менее 100 ГГц) позволяют мультиплексировать не более 64 каналов. Системы HDWDM (системы с частотным разносом каналов 50 ГГц и менее) позволяют мультиплексировать не менее 64 каналов. Эти системы находят применение на сетях телекоммуникации различного уровня и назначенияТехнология WDM заключается в одновременной передаче различных информационных сигналов по разным каналам. Каждый канал передается на определенной длине волны, отличной от длины волны другого канала. Схема построения WDM систем передачи приведена на рисунке 11.4.

Рисунок 11.4- Схема построения системы WDM

В соответствии с рекомендацией ITU T G.694.2, системы со спектральным уплотнением имеют несколько вариантов диапазонов волн для своей реализации. Наиболее распространенный вариант классификации:

O- начальный, первичный диапазон (Original, 1260-1360 нм);

E- расширенный диапазон (Extended, 1360-1460 нм);

S- коротковолновый диапазон (Short wavelength, 1460-1530 нм);
C- обычный, стандартный диапазон (Conventional, 1530-1570);
L- длинноволновый диапазон (Long wavelength, 1570-1625 нм).
На рисунке 11.5 показано распределение длин волн по диапазонам.

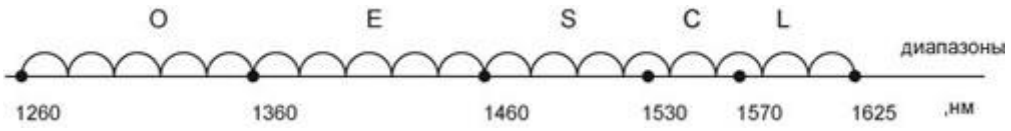



Рисунок 11.5- Распределение длин волн по диапазонам

WDM-оборудование, включающее в себя преобразователи оптического сигнала (транспондеры), усилители, фильтры и мультиплексоры, поставляют все крупнейшие телекоммуникационные компании, включая Cisco, Alcatel-Lucent, Nortel, Ericsson, Huawei и др. Причем современные WDM-системы рассматриваются уже не только как средство повышения пропускной способности оптического волокна, но и как надежный базис для опорной инфраструктуры мультисервисных и мобильных сетей. А возможность интеграции с другими протоколами передачи данных делает ее ключевой технологией в процессе конвергенции различных услуг связи. В США, где очень хорошо развита волоконно-оптическая инфраструктура, DWDM уже де-факто считается стандартом
для создания высокоскоростных транспортных сетей.

Скорость передачи в такой системе можно увеличивать по двум направлениям: во-первых, увеличением числа каналов (длин волн), во-вторых, повышением скорости передачи информации в одном канале. Сочетание двух данных направлений позволяет повысить скорость передачи существенно сильней, чем при действии в одном направлении. Например, использование двух каналов вместо одного позволяет уже увеличить скорость передачи в два раза, а повышение скорости в каждом из каналов- еще в четыре раза.

При передаче информации по оптическим волокнам существуют несколько ограничивающих факторов:

- затухание оптического сигнала, с которым сегодня успешно борются с помощью оптических усилителей;

- дисперсионное уширение сигнала, связанное с зависимостью скорости распространения сигнала по волокну от длины волны- хроматическая дисперсия и от поляризации- поляризационная модовая дисперсия. С уширением сигнала, вызванным хроматической дисперсией, можно бороться с помощью компенсаторов хроматической дисперсии, широко используемых в настоящее время. Коммерчески доступных на сегодняшний день средств борьбы с поляризационной модовой дисперсией нет (они находятся в стадии разработки);

- нелинейные эффекты, такие как четырехволновое взаимодействие, фазовая самомодуляция, фазовая кроссмодуляция и вынужденное рассеяние, как правило, не оказывают существенного влияния на качество передачи при сегодняшних задачах и, по-видимому, станут причиной ограничения широкополосности завтра.

Поэтому внедрение технологии спектрального уплотнения повышает требования к техническим параметрам сетей передачи информации, таким как дисперсионные характеристики.

На заре развития технологии WDM процессу стандартизации ее основных параметров: шага между несущими, длины и числа пролетов (секций), бюджета оптической мощности уделялось мало внимания, так как эта технология использовала в качестве источника сигнала выходной сигнал мультиплексора SDH, а длина пролета была привязана к длине одной из стандартных секций SDH. Поэтому среди систем WDM в то время можно было встретить системы с двумя каналами: 1310 и 1550 нм, где разнос частот 240 нм диктовался только желанием сопрячь системы SDH, работающие с двумя стандартными несущими, или с 5-7 каналами с шагом 3,2 или 1,6 нм, длина пролета и бюджет мощности которых не нормировался. О классификации самих систем WDM не было и речи.

Однако бурное развитие WDM привело к появлению первого, хотя и временного (класса draft) стандарта ITU-T (1997), который впоследствии был одобрен и опубликован в 1999 году как стандарт для многоканальных систем SDH с оптическими усилителями G.692. Этот стандарт рекомендовал использовать частотный план с шагом несущих 100 ГГц (0,8 нм) и больше, хотя в разработках новых систем WDM, которые уже именовались как плотные WDM, или DWDM, уже использовался шаг 50 ГГц (0,4 нм). Результатом дальнейшего развития оптической интегральной схемотехники стало уменьшение шага между несущими последовательно до 50, 25 и 12,5 ГГц, о чем в момент разработки первого стандарта можно было только мечтать.

Основные преимущества технологии DWDM состоят в следующем:

- дальнейшее повышение коэффициента использования частотного потенциала оптического волокна (его теоретическая полоса пропускания - 25 000 ГГц)- достижение терабитных скоростей;

- отличная масштабируемость- повышение суммарной скорости сети за счет добавления новых спектральных каналов без необходимости замены всех магистральных модулей мультиплексоров (что требуется для перехода к новому уровню STM-N в сетях SDH;

- экономическая эффективность за счет отказа от электрической регенерации на участках сети большой протяженности;

- независимость от протокола передачи данных- технологическая «прозрачность», позволяющая передавать через магистраль DWDM трафик сетей любого типа;

- независимость спектральных каналов друг от друга;

- совместимость с технологией SDH- мультиплексоры DWDM оснащаются интерфейсами STM-N, способными принимать и передавать данные мультиплексоров SDH;

- совместимость с технологиями семейства Ethernet- Gigabit Ether-net и 10 GE;

- стандартизация на уровне ITU-T.

Рассмотрим типовые топологии сетей DWDM.

Топология «точка-точка». Наиболее популярным применением DWDM на первых этапах жизненного цикла этой технологии является создание сверхдальних высокоскоростных магистралей (Ultralong Haul), в которых применяется топология «точка-точка» (рисунок 11.6).

Для организации такой магистрали достаточно в ее конечных точках установить терминальные мультиплексоры DWDM, а в промежуточных- оптические усилители, если этого требует расстояние между ко-нечными точками. Терминальный мультиплексор включает собственно блок мультиплексирования-демультиплексирования, выходной (B, Boos-ter) и предварительный (P, Pre-amplifier) усилители, а также набор транс-пондеров (T, Transponder), преобразующих входные сигналы от источников, длина волны которых не соответствует частотному плану мультиплексора, в волны требуемой длины.

В тех случаях, когда некоторое подключаемое к сети DWDM устройство способно вырабатывать сигнал на волне одной из частот, поддерживаемых мультиплексором DWDM (плана ITU-T G.692 или частного плана производителя) транспондеры не используются. В этом случае говорят, что подключаемое к сети DWDM устройство имеет «окрашенный» интерфейс.

В рекомендации ITU-T G.692 определены три типа усилительных участков, то есть участков между двумя соседними мультиплексорами DWDM:

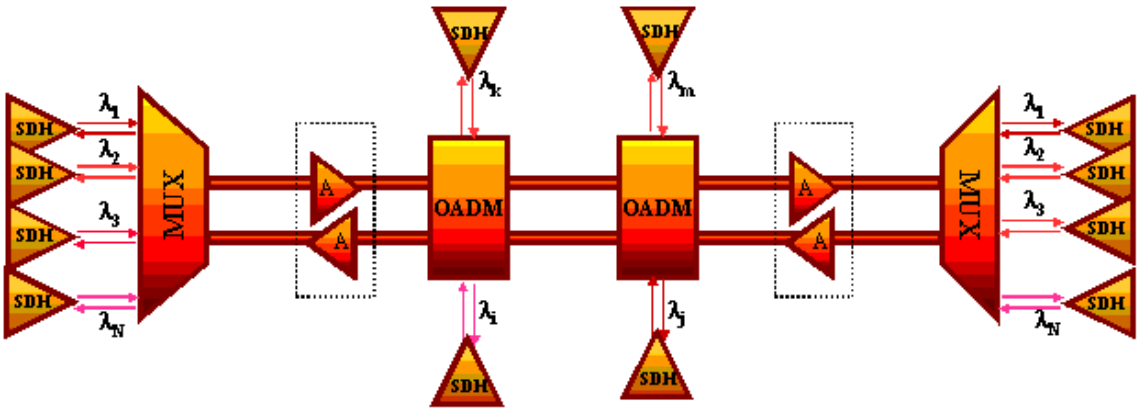



Рисунок 11.6- Цепь DWDM с вводом-выводом
в промежуточных узлах

- L (Long)- участок состоит максимум из 8-и пролетов ВОЛС и 7-и оптических усилителей, максимальное расстояние между усилителями до 80 км при общей максимальной протяженности участка 640 км;

- V (Very long)- участок состоит максимум из 5-и пролетов ВОЛС и 4-х оптических усилителей, максимальное расстояние между усилителями до 120 км при общей максимальной протяженности участка 600 км;

- U (Ultra long)- участок без промежуточных усилителей длиной до 160 км.

Ограничения на количество пассивных участков и их длину связаны с некоторой деградацией оптического сигнала при его оптическом усилении- хотя оптический усилитель EDFA восстанавливает мощность сигнала, но не полностью компенсирует эффект хроматической дисперсии (то есть распространения волн разной длины с разной скоростью, из-за чего сигнал на приемном конце волокна «размазывается»), а также такие нелинейные эффекты как рамановское рассеивание, четырехволновое смешение и нестабильность модуляции. Поэтому для построения более протяженных магистралей необходимо между усилительными участками устанавливать мультиплексоры DWDM, выполняющие регенерацию сигнала за счет его преобразования в электрическую форму и обратно, то есть работающие по принципу O-E-O. Ситуацию частично улучшают специальные компенсаторы дисперсии, но полностью восстановить качество сигнала они не могут. Оптические мультиплексоры ввода/вывода (OADM) могут вывести из общего оптического сигнала волну определенной длины и ввести туда сигнал этой же длины волны, так что спектр транзитного сигнала не изменится, а соединение будет выполнено с одним из абонентом, подключенных к промежуточному мультиплексору

## Лекция № 12 Транспортная технология MPLS

*Цель лекции: изучение архитектуры мультипротокольной коммутации по меткам (MPLS - Multi-Protocol Label Switching).*

Архитектура MPLS регламентируется в документе IETF «Multiprotocol Label Switching Architecture» (RFC3031).

В традиционных сетях IP, в общем случае, маршрутизация пакетов осуществляется на основе IP адреса назначения (destination IP address). Каждый маршрутизатор в сети обладает информацией о том, через какой интерфейс и какому соседу необходимо перенаправить пришедший IP-пакет.

В MPLS каждому IP-пакету назначается некая метка. Маршрутизаторы принимают решение о передаче пакета следующему устройству на основании значения метки. Метка добавляется в составе MPLS заголовка, который добавляется между заголовком кадра (второй уровень OSI) и заголовком пакета (третий уровень модели OSI) (рисунок 12.1).

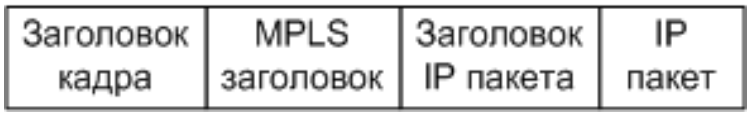


Рисунок 12.1 – Место MPLS заголовка в кадре

Формат MPLS заголовка представлен на рисунке 12.2

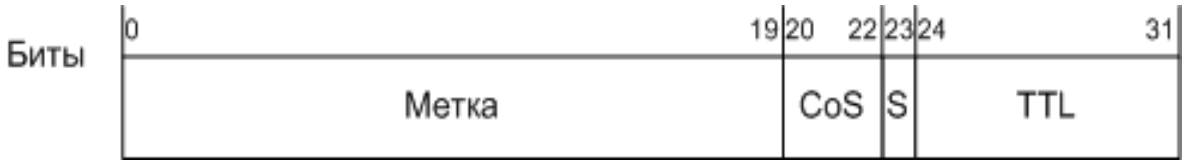



Рисунок 12.2 – Формат MPLS-метки

Описание полей MPLS-заголовка:

метка - собственно метка, по которой и осуществляется коммутация;

CoS – поле, описывающее класс обслуживания пакета (аналог IP precedence);

TTL - time-to-live - аналог IP TTL;

S - одному пакету может быть назначено несколько меток («стек» меток). S - поле-флаг, обозначающий то, что метка последняя в «стеке». Пример изображён на рисунке 12.3

| Заголовок кадра | MPLS заголовок №3 | MPLS заголовок №2 | MPLS заголовок №1 | Заголовок IP пакета | IP пакет |
|---|---|---|---|---|---|

Рисунок 12.3 – Пример назначения стека меток

В рамках архитектуры MPLS различают следующие типы устройств:

1) LSR - Label-Switch Router - маршрутизатор, поддерживающий коммутацию по меткам и традиционную IP-маршрутизацию.

2) Edge LSR - маршрутизатор, подключённый к устройствам, не осуществляющим коммутацию по меткам (устройства могут, используют другую политику маршрутизации или вообще не поддерживают MPLS).

3) MPLS domain - MPLS-домен - группа соединённых устройств, осуществляющих коммутацию по меткам, находящихся под единым административным подчинением и функционирующих в соответствии с единой политикой маршрутизации. MPLS домен образуется LSR-ами, а на границе домена размещаются устройства E-LSR.

4) LSR выполняет два процесса: маршрутизации и коммутации по меткам. Процесс маршрутизации функционирует на базе внутреннего протокола маршрутизации (например, OSPF). Процесс маршрутизации получает маршрутную информацию от соседей и формирует таблицу

маршрутизации. Таблица маршрутизации используется для маршрутизации обыкновенных IP-пакетов.

Процесс коммутации функционирует на базе протокола обмена метками между соседями (Label Distribution Protocol). Протокол обмена метками согласует конкретные значения меток для создания целостных маршрутов коммутации по меткам (LSP). Процесс коммутации по меткам при составлении таблиц коммутации использует также таблицу IP-маршрутизации. Взаимосвязь процессов коммутации по меткам и IP-маршрутизации приведена на рисунке 12.4.

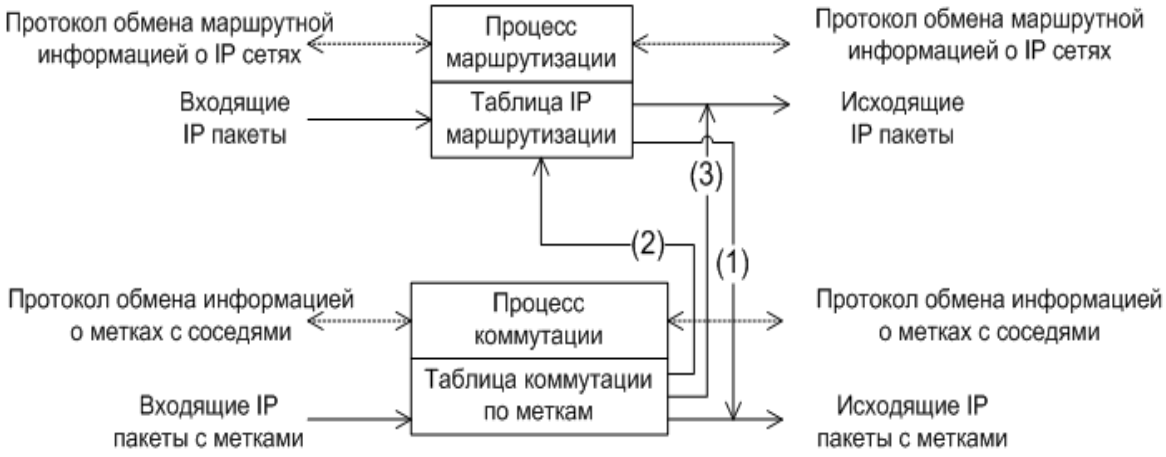



Рисунок 12.4 – Взаимосвязь процессов MPLS-коммутации и IP-маршрутизации на LSR/E-LSR

Таблица 12.1 – Основные функции выполняемые E-LSR/LSR-ами

| Функция | Англоязычное название | Описание |
|---|---|---|
| Традиционная маршрутизация IP-пакетов | IP routing | Входящие IP-пакеты маршрутизируются на основе таблицы маршрутизации |
| Назначение метки | label imposing | Если устройство функционирует в качестве E-LSR, то для входящего IP-пакета на базе таблицы IP-маршрутизации определяется метка, которая должна быть назначена, и выходной интерфейс, через который должен быть переслан пакет (1) |
| Коммутация по метке | label swapping | Входящие IP-пакеты с метками обрабатываются процессом коммутации по меткам, который на основании таблицы |
| Снятие метки | label poping | |

| | | |
|---|---|---|
| Снятие метки (PHP) | Label poping with PHP | коммутации по меткам определяет, какое из следующих действий будет выполнено:<br>- пересылка пакета со сменой метки через определённый интерфейс (label swapping). При этой операции возможно назначение дополнительных меток в «стек»;<br>- снятие метки и одно из следующих действий;<br>- если метка была последняя в стеке, то пакет передаётся процессу маршрутизации IP-пакетов (2) (традиционная коммутация) или пересылается через определённый интерфейс (коммутации с PHP) (3);<br>- если метка была не последняя в стеке, то пакет пересылается через определённый интерфейс. |
| П р и м е ч а н и е: выходной интерфейс определяется на основе таблицы коммутации по меткам. | | |

Необходимо отметить, что уникальность меток обеспечиваться только на уровне интерфейса, то есть для двух разных входных интерфейсов могут встречаться одинаковые значения меток (в таблице коммутации первая и вторая запись). Таким образом, пакет, пришедший с меткой 100 с интерфейса Serial1 и пакет, пришедший с меткой 100 с интерфейса Ethernet2, проследуют по разным LSP. Уникальной комбинацией является входящий интерфейс и метка. И для этой уникальной комбинации однозначно определяется выходной интерфейс и операция, которая должна быть произведена над меткой. Такой подход позволяет образовывать целостные LSP между E-LSR-ам.

Примечание: различные производители могут по-разному реализовывать архитектуру LSR/E-LSR. Например, возможно использовать объединённую таблицу IP-маршрутизации и MPLS-коммутации. Или использовать три таблицы: одна только для традиционной IP-маршрутизации, другая для назначения меток, третья для MPLS-коммутации. Приведённая в данном документе архитектура LSR/E-LSR лишь абстрактная модель.

## Список литературы

**Основная:**

1. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов / В.В. Крухмалев и др. – М.: Горячая линия – Телком, 2004. – 510 с.
2. Многоканальные телекоммуникационные системы: Учебник/ В.Н. Гордиенко. – М.: Новое поколение, 2005, 2007, 2013. – 751 с.
3. Иванов В.И., Гордиенко В.Н. и др. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов/ Под ред. В.И. Иванова. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 232 с.
4. Телекоммуникационные системы и сети. Под ред. В.П.Шувалова:Учебное пособие В 3-х томах. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003, 2012, 2015

**Дополнительная:**

5. Зингеренко Ю.А Цифровые системы передачи. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 393 с.
6. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. – 148 с.
7. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. – Издательство: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2008. – 288 с.
8. DWDM-системы. Листвин В.М., Трещиков В.Н. –Москва:Техносфера, 2015г. 278 с.

**Методические материалы, конспекты лекций и учебные пособия АУЭС:**

1. Многоканальные телекоммуникационные системы. Конспект лекций.Агатаева Б.Б. –Алматы АИЭС,2009.
2. Көпарналы телекоммуникациялық жүйелер. 2-ші бөлім Дәрістер жинағы./құрастырушы Б.Б.Ағатаева.-Алматы, АЭжБУ,2005.
3. Многоканальные телекоммуникационные системы - Методическиеуказания к выполнению курсовых работ. Агатаева Б.Б., Шахматова Г.А. – Алматы: АУЭС,2012.
4. Көпарналы телекоммуникациялық жүйелер. Курстыкжумыскаарналган адістемелік нускау. Агатаева Б.Б.,Шахматова Г.А.АЭжБУ, 2012.
5. Многоканальные телекоммуникационные системы - Методическиеуказания к выполнению лабораторных работ. Шахматова Г.А., Киргизбаева А.У. – Алматы: АУЭС,2012.
6. Многоканальные телекоммуникационные системы. Учебное пособие. Агатаева Б.Б., Коньшин С.В. –Алматы, АИЭС.,2009.
7. Көпарналы телекоммуникациялық жүйелер. Көпарналы тарату жүйелері. Ағатаева Б.Б. -Алматы, АЭжБУ, 2006.

8. Многоканальные телекоммуникационные системы – Сборник задач. Шахматова Г.А. – Алматы: АИЭС,2011.

9. Транспортные телекоммуникационные сети. Конспект лекций. А.С Байкенов., К.С. Чежимбаева. –Алматы АИЭС,2014- 54 с.

11.Байкенов А.С. Транспортные сети на основе аппаратуры SMA-1 уч. Пособие. АИЭС, Алматы 2009

## Содержание

Введение 3
1 Лекция № 1. Основные понятия и определения 4
2 Лекция № 2. Основные параметры и характеристики каналов 7
3 Лекция № 3. Принципы построения систем передачи 10
4 Лекция № 4. Построения цифровых систем передачи(PDH) 18
5 Лекция № 5. Узлы аппаратуры ЦСП 24
6 Лекция № 6. Линейный тракт ЦСП 31
7 Лекция № 7. Регенерация линейных сигналов 34
8 Лекция № 8. Иерархии ЦСП (PDH) 36
9 Лекция № 9. Современные технологии(SDH) 41
10 Лекция № 10.Построение оборудования SDH 47
11 Лекция № 11. Технологии NGSDH, WDM, DWDM 53
12 Лекция № 12. Технология MPLS 60
Список литературы 63

Сводный план 2019 г., поз. 252

Байкенов Алимжан Сергеевич
Темырканова Эльвира Кадылбековна
Киргизбаева Айнура Увалиевна

# МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Методические указания к конспекту лекции
для студентов всех форм обучения специальности
05071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Редактор Л.Т. Сластихина
Специалист по стандартизации Н.К. Молдабекова

Подписано в печать
Тираж 20 экз.
Объём 3,4 уч.-изд.л.

Формат 60х84 1/16
Бумага типографская №1
Заказ___Цена 1700 тенге

Копировально-множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
"Алматинский университет энергетики и связи"
050013, Алматы, Байтурсынова, 126