



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО



«Компьютерные сети»

Лектор: АЛИЕВ Тауфик Измайлович, *д.т.н., профессор*

**Национальный исследовательский университет ИТМО
(НИУ ИТМО)**

Факультет программной инженерии и компьютерной техники

Рекомендуемая литература

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 5-е изд. – СПб: Питер, 2016. – 944 с.
2. Алиев Т.И. Сети ЭВМ и телекоммуникации. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 400 с.
3. Алиев Т.И., Соснин В.В., Шинкарук Д.Н. Компьютерные сети и телекоммуникации: задания и тесты. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 111 с.
4. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. – СПб: Питер, 2015. – 961 с.
5. Куроуз Дж. Компьютерные сети: Нисходящий подход / Джеймс Куроуз, Кит Росс – 6-е изд. – М.: Издательство «Э», 2016. – 912 с.

Разделы дисциплины

Раздел 1. Принципы организации компьютерных сетей

Раздел 2. Глобальная сеть Интернет

Раздел 3. Технологии локальных сетей

Раздел 4. Транспортные технологии глобальных сетей

Раздел 5. Заключительный раздел

Принципы организации компьютерных сетей

- 1.1. Основные понятия и терминология
- 1.2. Состав и типы компьютерных сетей
- 1.3. Многоуровневая организация компьютерных сетей
- 1.4. Структурная организация компьютерных сетей
- 1.5. Функциональная организация компьютерных сетей
- 1.6. Параметры и характеристики компьютерных систем
- 1.7. Сетевые протоколы

1.1. Основные понятия и терминология

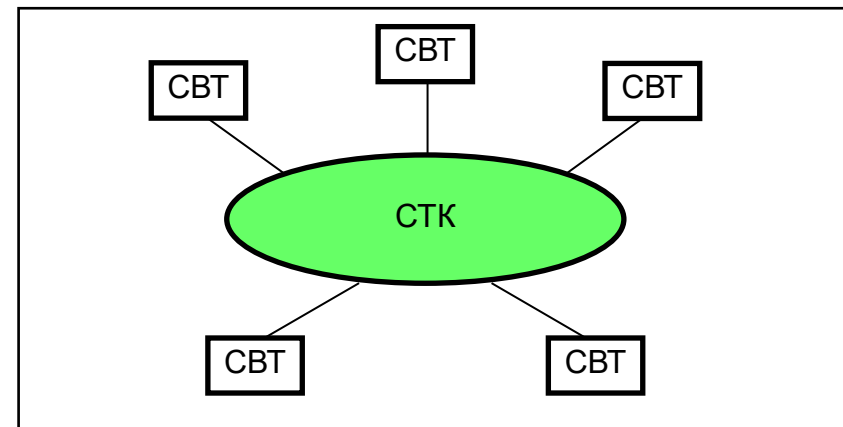
Понятие компьютерной сети

Компьютерная сеть (сеть ЭВМ, вычислительная сеть) – совокупность средств ВТ и телекоммуникаций: **СВТ+СТК**.

Функции компьютерной сети: *обработка и передача данных* (или **информации?**).

Средства вычислительной техники (СВТ) – ЭВМ, вычислительные комплексы и системы различных классов (*обработка данных*).

Средства телекоммуникаций (СТК) – взаимосвязанная совокупность каналов связи и каналообразующей аппаратуры (*передача данных*).



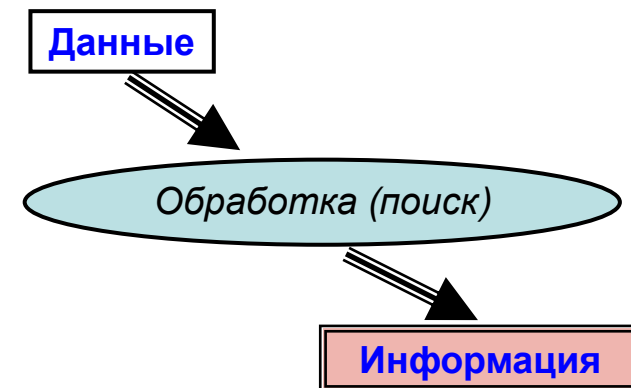
Данные - "сведения, необходимые для какого-нибудь вывода, решения" (Ожегов С.И. Словарь русского языка). Количественная мера данных – **объем**.

Информация - "сведения, осведомляющие о положении дел, о состоянии чего-нибудь" (Ожегов С.И. Словарь русского языка). Количественная мера информации – **информационная энтропия**.

Информационная энтропия — мера неопределённости, определяемая через вероятность p_i появления i -го символа некоторого алфавита или i -го сообщения:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

n	p_1	p_2	p_3	p_4	H
2	0,5	0,5	-	-	1
2	0,1	0,9	-	-	0,47
4	0,25	0,25	0,25	0,25	2
4	0,1	0,2	0,3	0,4	1,85
4	0,01	0,04	0,3	0,65	1,2



1.1. Основные понятия и терминология

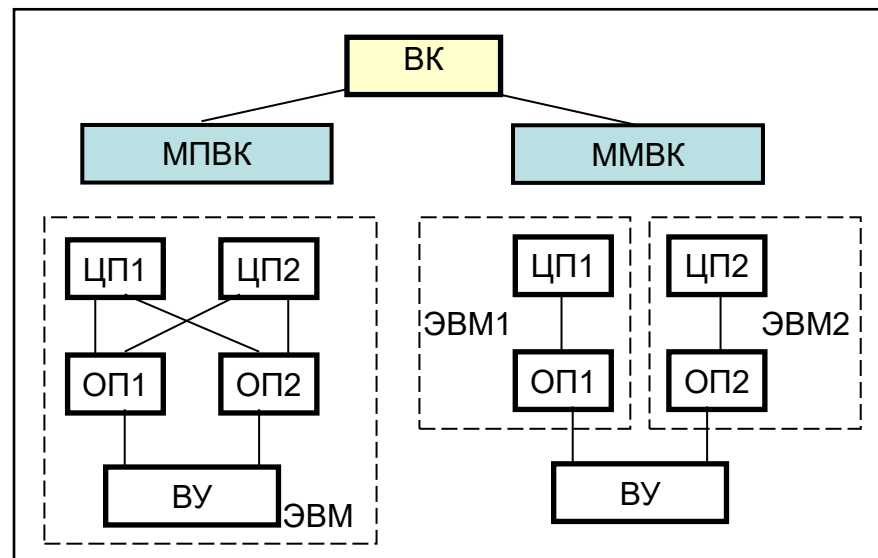
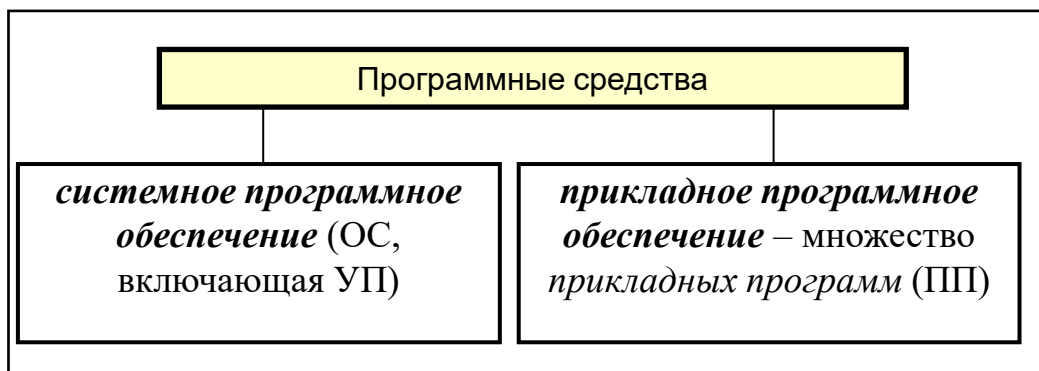
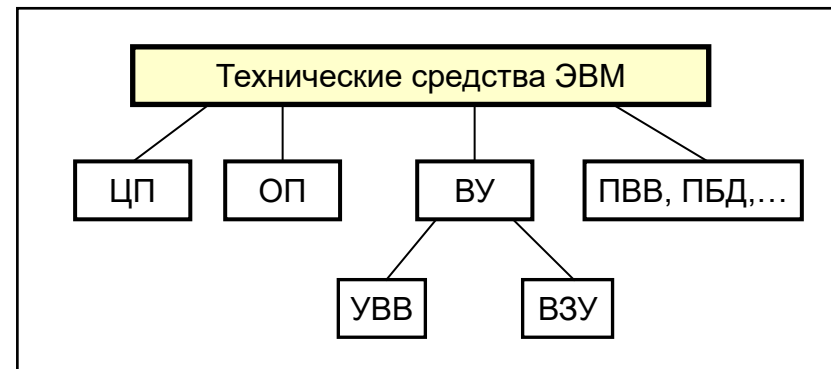
Средства вычислительной техники (1)

ЭВМ (*электронная вычислительная машина, компьютер*) = совокупность *технических средств*, реализующих ввод, вывод, хранение и обработку данных (информации)

Вычислительный комплекс (ВК) = совокупность *технических средств*, содержащая несколько центральных процессоров.

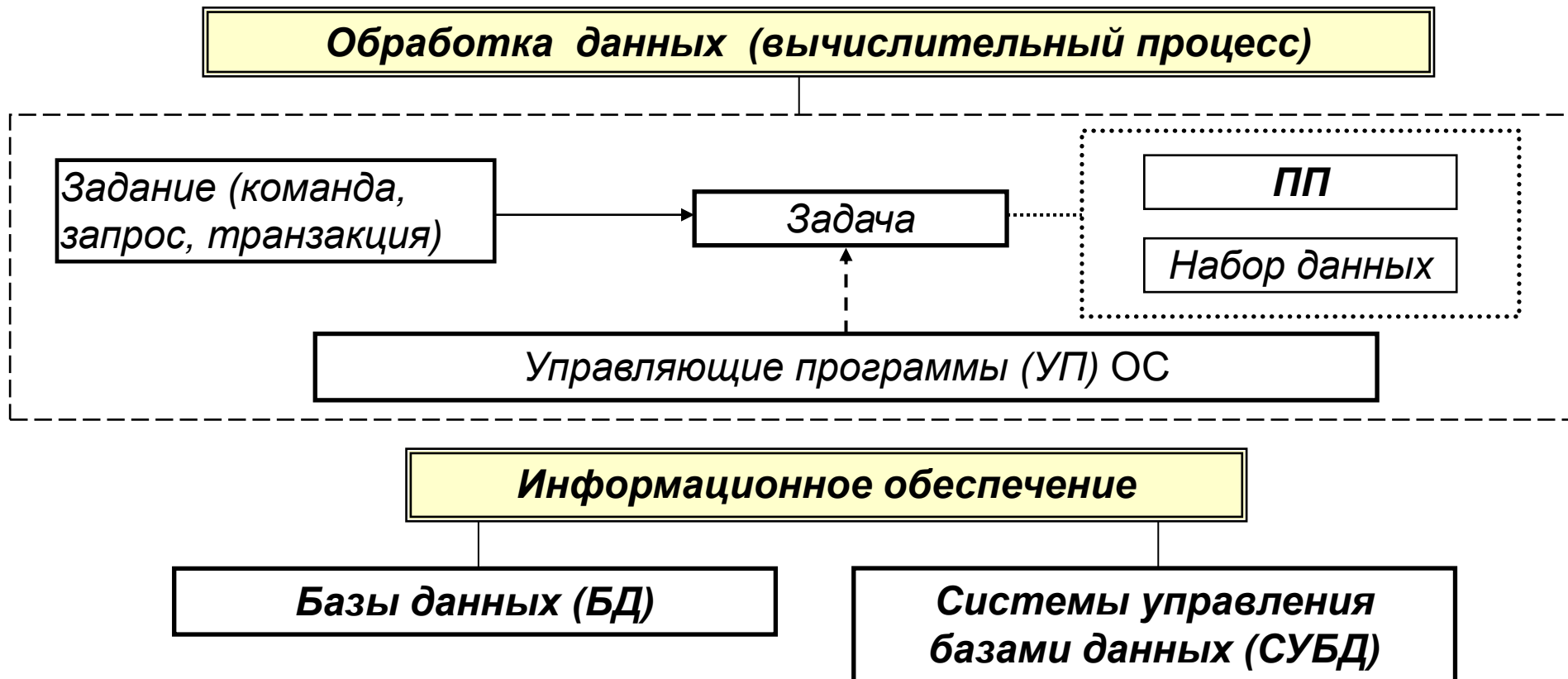
Основная цель построения ВК – обеспечение *высокой надежности и/или производительности*.

Вычислительная система (ВС) = *технические + программные средства*.



1.1. Основные понятия и терминология

Средства вычислительной техники (2)

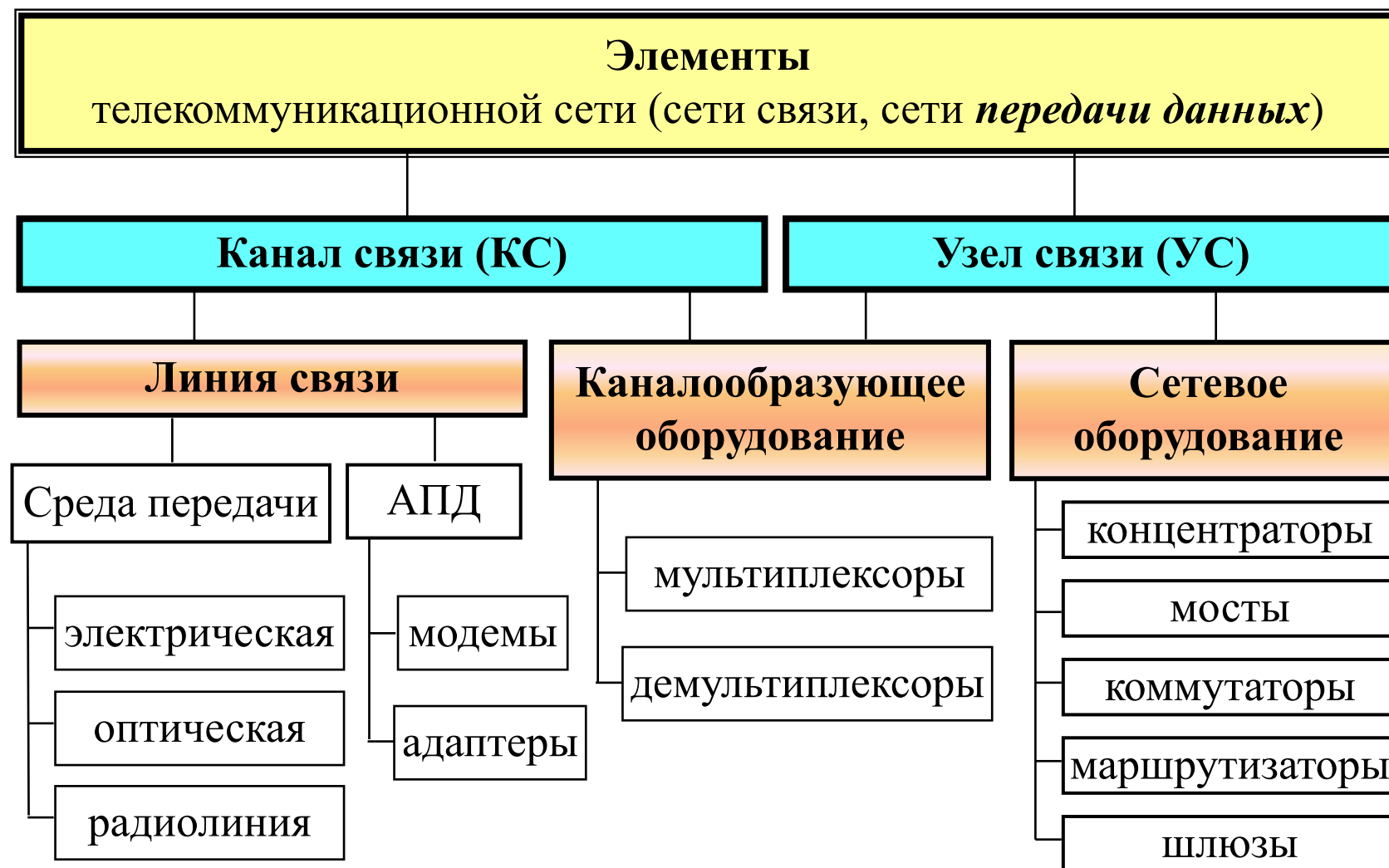


ВС, реализованные на базе *однопроцессорной* ЭВМ (компьютера) или на базе ММВК и МПВК, можно объединить общим термином «**вычислительные** или **компьютерные системы**».

Компьютерная сеть может рассматриваться как *компьютерная система* более высокого уровня.

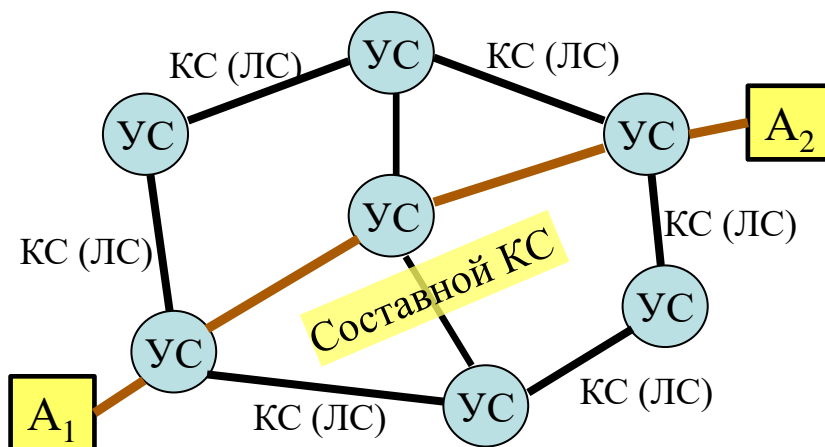
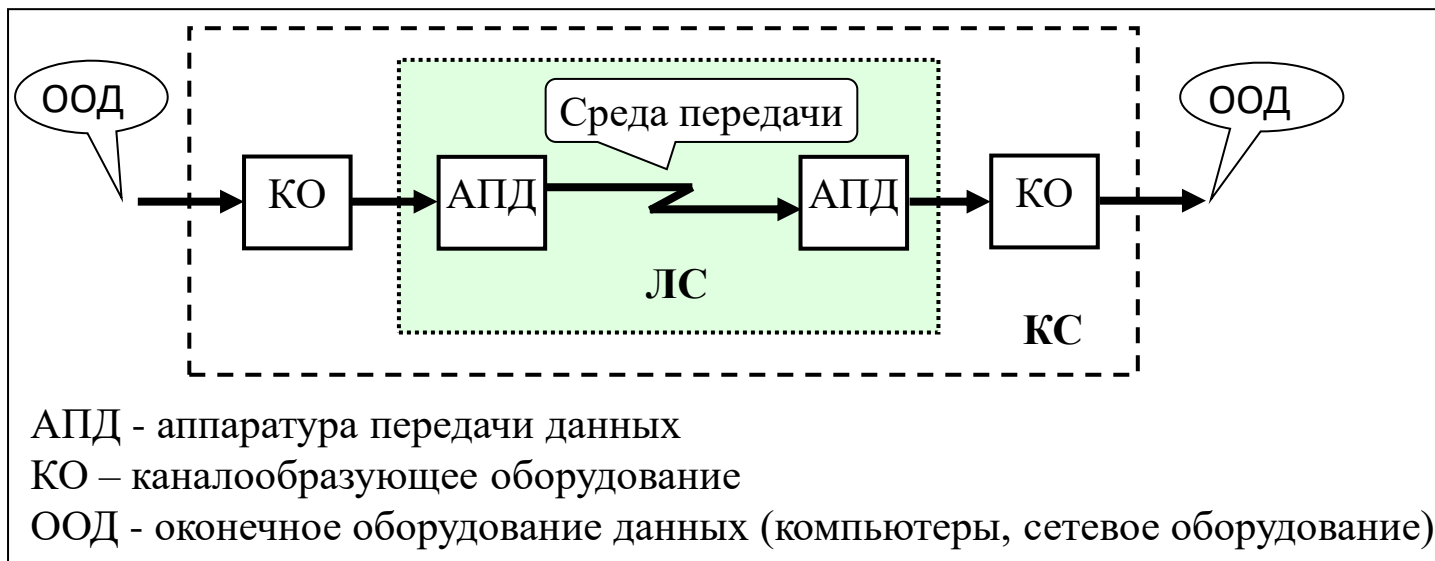
1.1. Основные понятия и терминология

Средства телекоммуникаций (1)



1.1. Основные понятия и терминология

Средства телекоммуникаций (2)



Основные функции УС

маршрутизация

коммутация

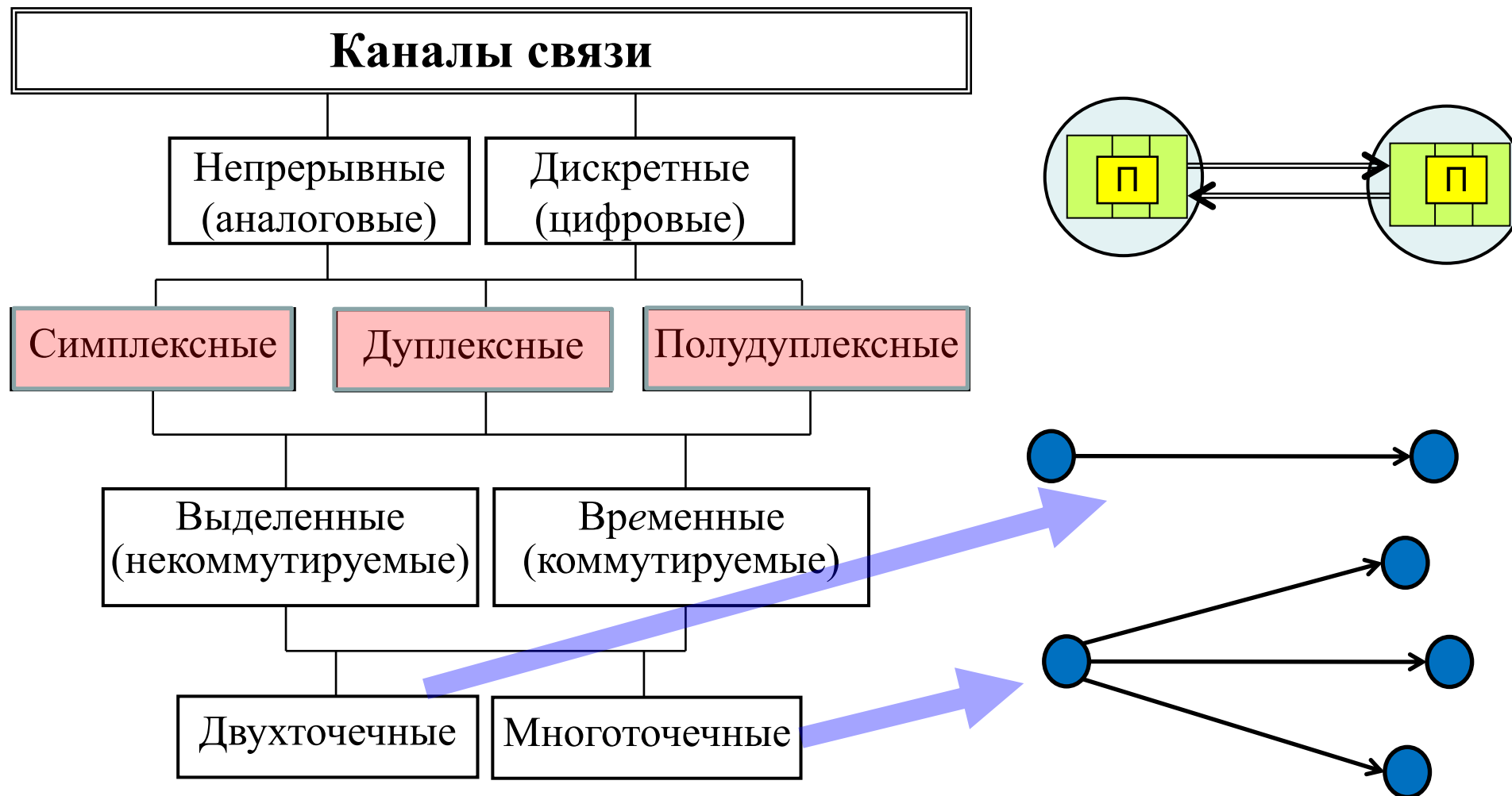
мультиплексирование

демультиплексирование

Топология телекоммуникационной сети – способ объединения УС с помощью КС (ЛС).

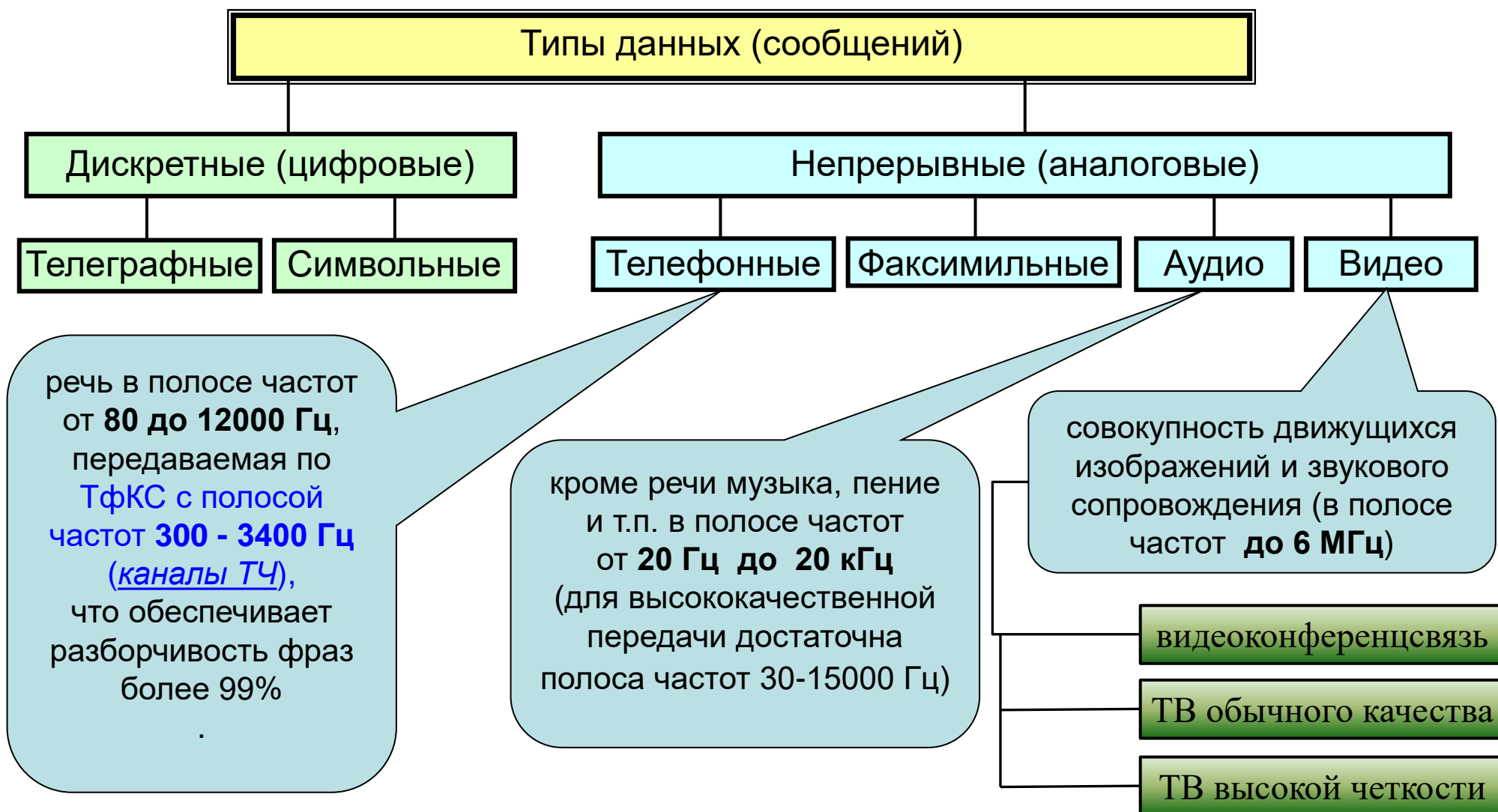
1.1. Основные понятия и терминология

Классификация каналов связи

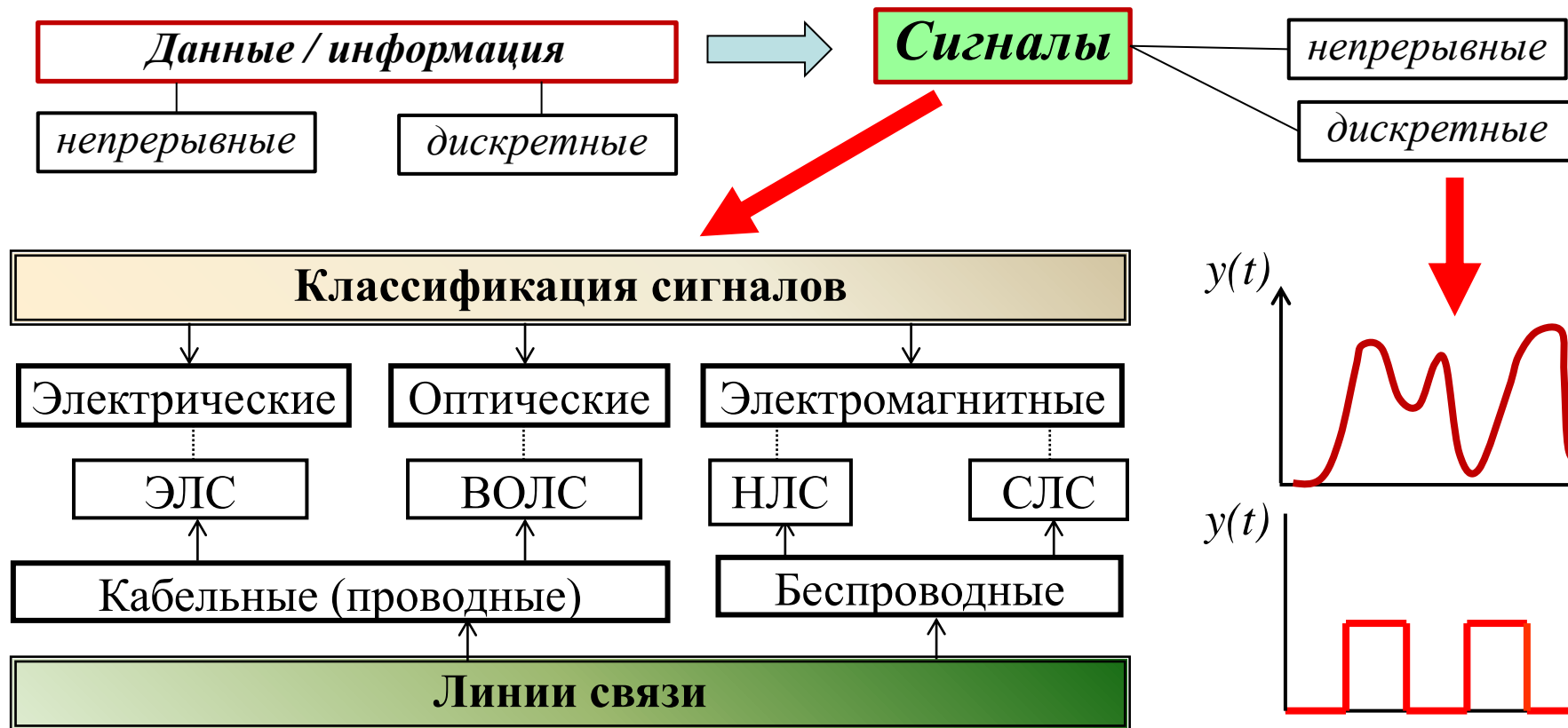


1.1. Основные понятия и терминология

Классификация данных



Данные и сигналы



Кодирование – представление дискретных данных в виде дискретных сигналов: *потенциальных и импульсных*.

Модуляция – перенос сигнала в заданную полосу частот путем изменения параметров сигнала (амплитуды, частоты, фазы) в соответствии с *информативным* сигналом.

Кабельные линии связи

Классификация кабельных линий связи

Электрические (ЭЛС)

Витая пара

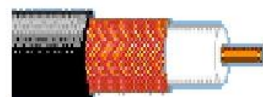
Коаксиальный кабель

Неэкрани-
рованная
(UTP)

Экрани-
рованная
FTP STP

Тонкий
(thin)

Толстый
(thick)



UTP - Unshielded Twisted Pair

FTP - Foiled Twisted Pair

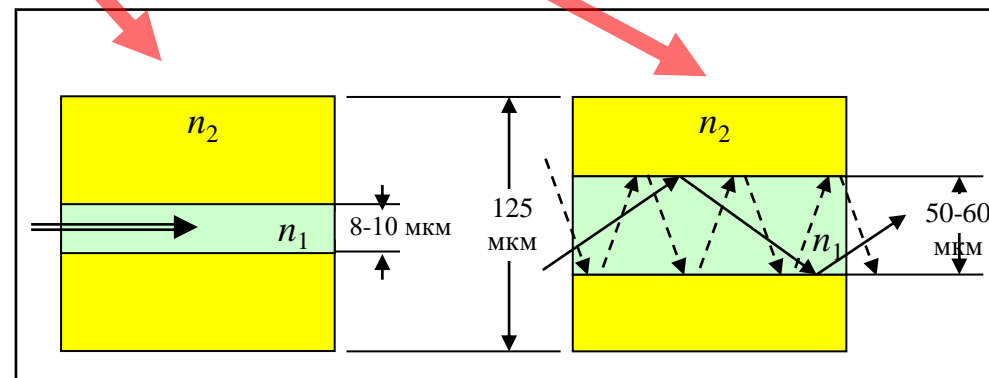
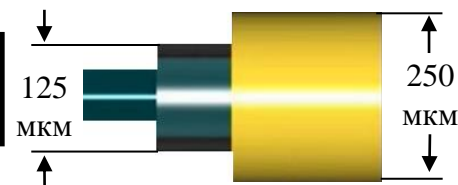
STP - Shielded Twisted Pair

Волоконно-оптические (ВОЛС)

Одномодовые
(8-10 мкм)

Многомодовые
(50-62,5 мкм)

Оптическое волокно



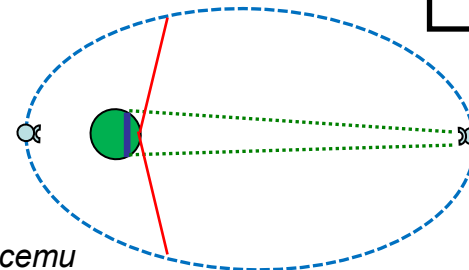
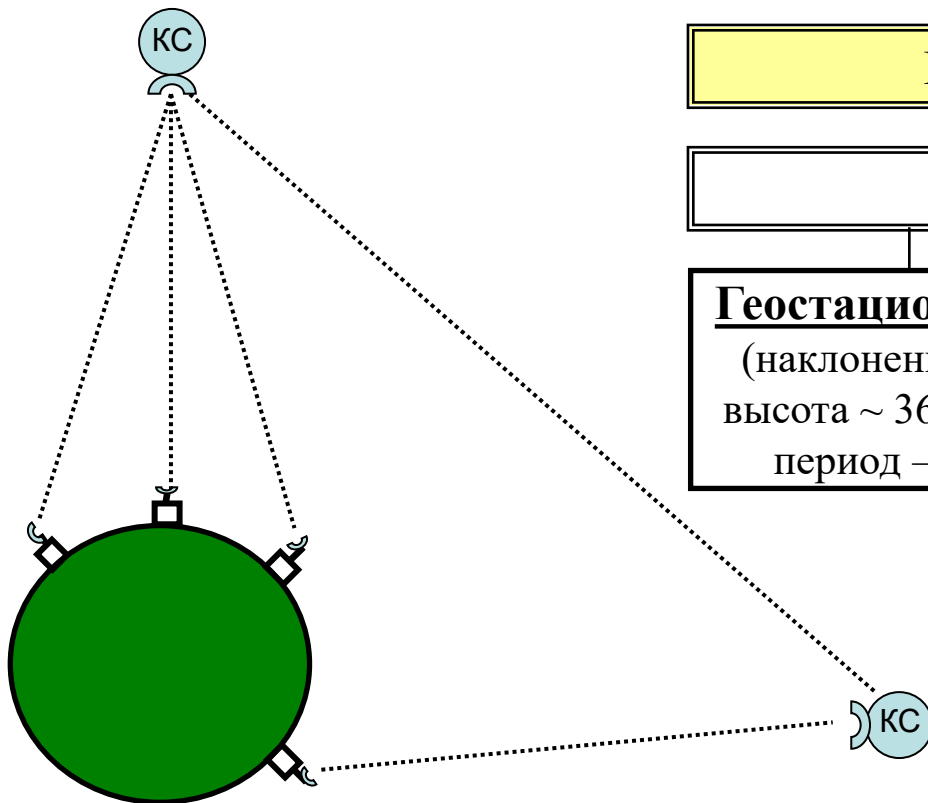
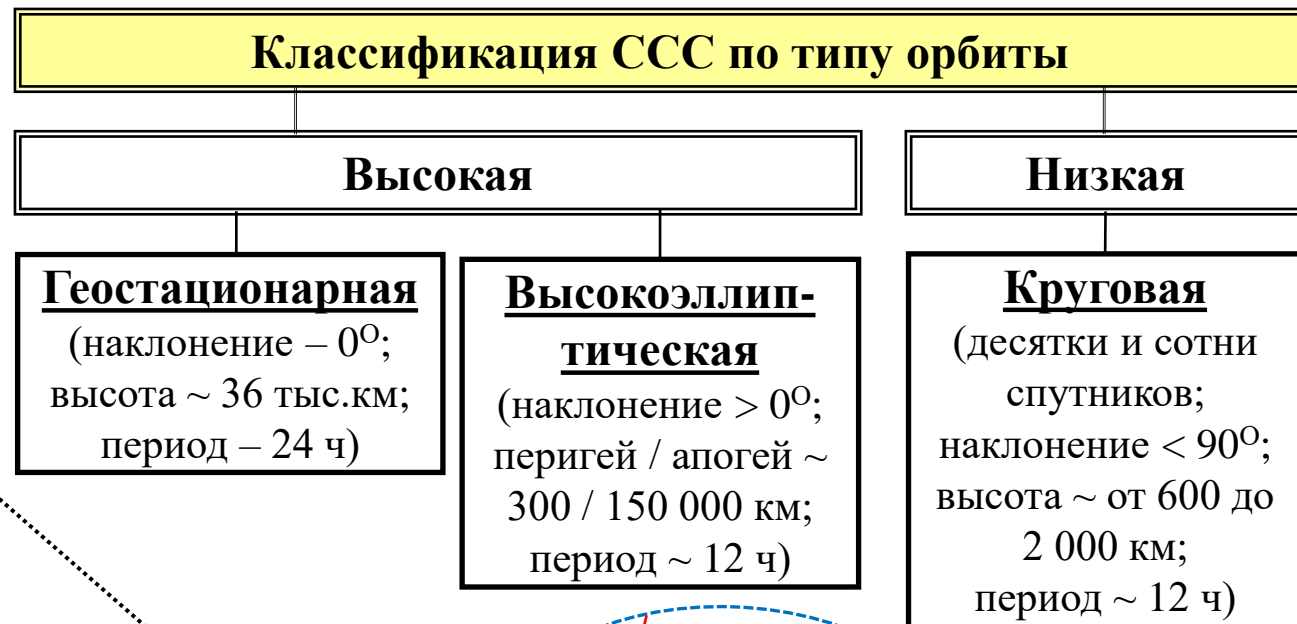
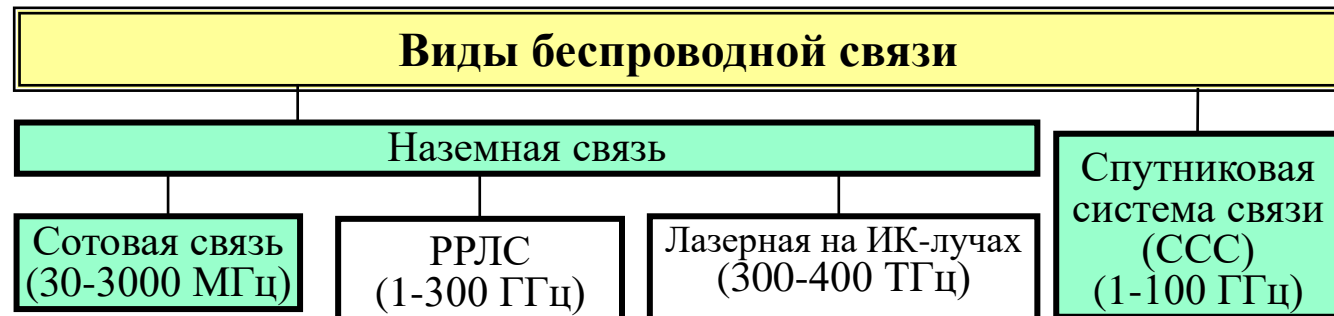
Основная характеристика кабельных линий связи – затухание сигнала:

- для электрического кабеля 5-й категории - не более 23,6 дБ на 100 м на частоте 100 МГц;
- для оптического волокна – 3 дБ на 1 км и менее (до 0,1 дБ).

Беспроводные каналы связи

Недостатки кабельных линий связи:

- высокая стоимость;
- подверженность механическим воздействиям;
- невозможность организации мобильной связи.



1.1. Основные понятия и терминология

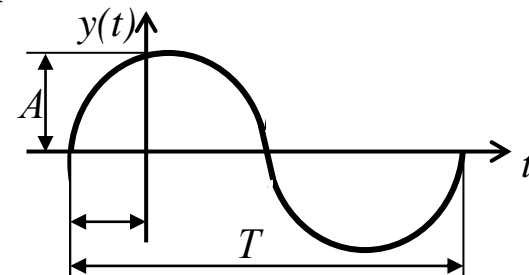
Характеристики каналов связи

1. Скорость модуляции [бод]: $B = \frac{1}{t_b} = \frac{2}{T} = 2F$,

где t_b – длина единичного (битового) интервала: $t_b = T/2$;

T – период синусоидального сигнала;

F – полоса пропускания канала: $F = 1/T$.



$t_b = 100 \text{ нс} \rightarrow C = 10 \text{ Мбит/с} \rightarrow T = 2t_b = 0,2 \text{ мкс} \rightarrow B = 10 \text{ Мбод} \rightarrow F = 5 \text{ МГц}$

2. Пропускная способность канала связи: $C = 1/t_b$ [бит/с или *bps* – bits per second]

1) формула Шеннона: $C = F \log_2(1 + \frac{P_c}{P_{ш}})$

$\frac{P_c}{P_{ш}}$ – SNR (*Signal-to-Noise Ratio*)

$F = 100 \text{ МГц}$: $\frac{P_c}{P_{ш}} = 1 \rightarrow C = 100 \text{ Мбит/с}$;

$\frac{P_c}{P_{ш}} = 3 \rightarrow C = 200 \text{ Мбит/с}$

2) формула Найквиста:

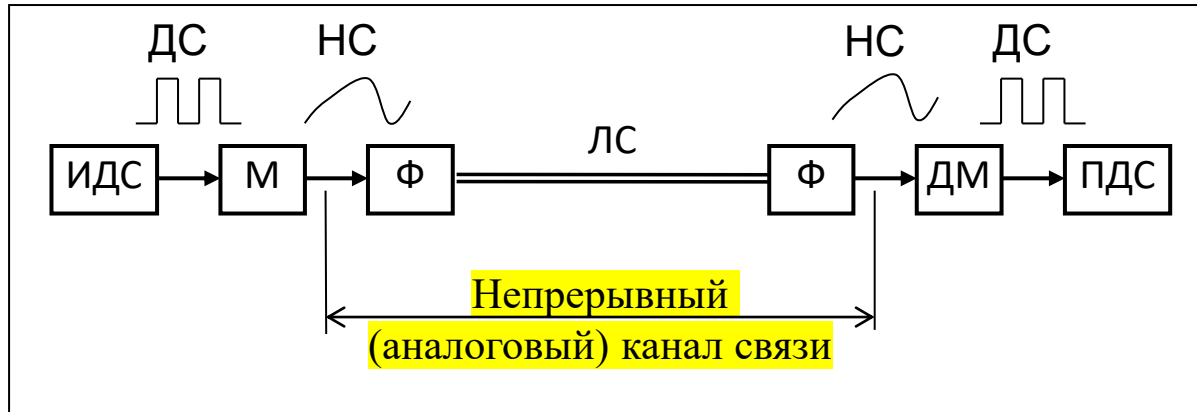
$$C = \frac{1}{t} \log_2 n_c = 2F \log_2 n_c = B \log_2 n_c$$

$F = 100 \text{ МГц}$: $n_c = 2$ $\rightarrow C = 200 \text{ Мбит/с}$;

$n_c = 4$ $\rightarrow C = 400 \text{ Мбит/с}$

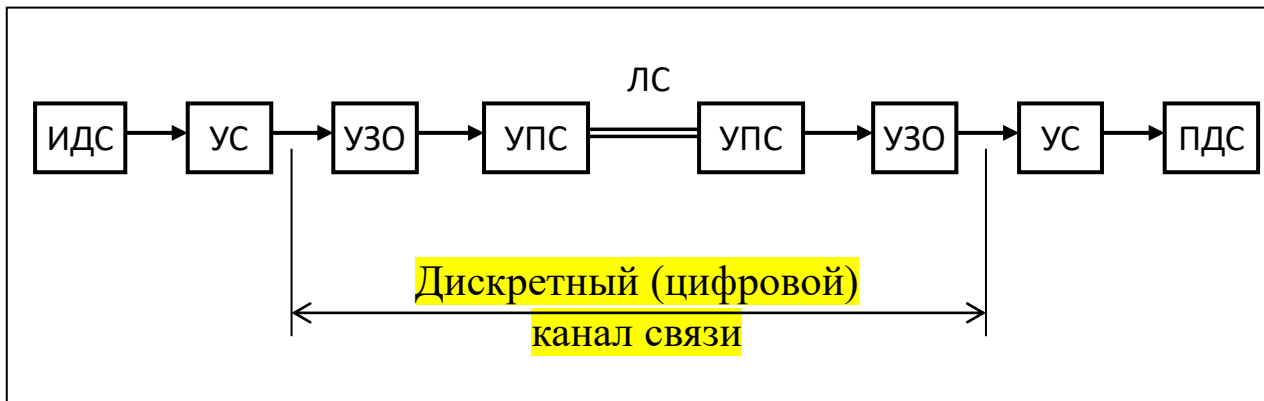
3. Достоверность передачи данных – вероятность искажения бита (10^{-4} до 10^{-10} и выше) при передаче по каналу связи [*BER* – Bit Error Rate].

Канонические схемы непрерывного и дискретного канала связи



ДС - дискретный (двоичный) сигнал;
НС - непрерывный сигнал;
ИДС (ПДС) - источник (приемник) двоичных сигналов;
М (ДМ) - модулятор (демодулятор);
Ф - фильтр.

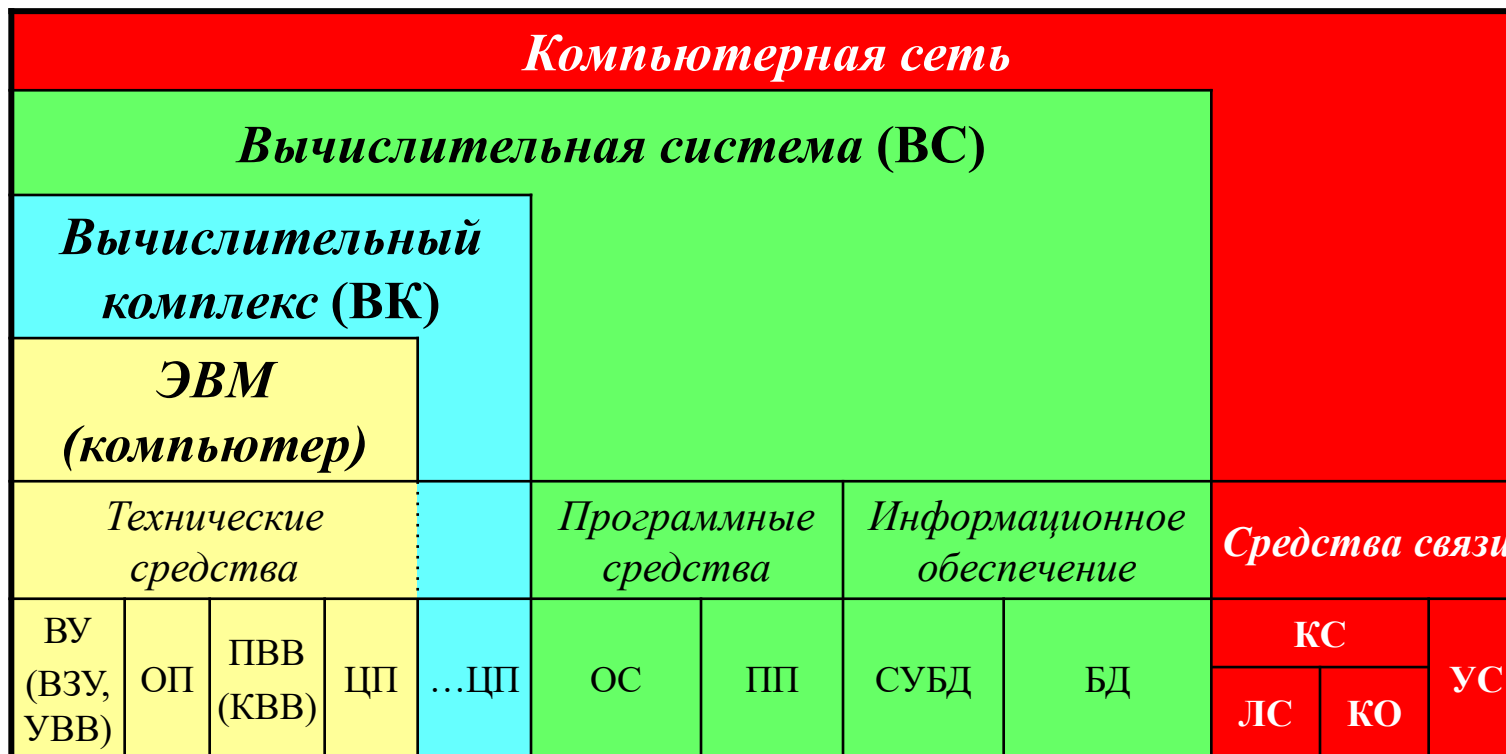
Канал ТЧ: $F=3100$ Гц ($f_n = 300$ Гц; $f_v = 3400$ Гц)



УС - устройство сопряжения с КС;
УЗО - устройство защиты от ошибок;
УПС - устройство преобразования сигналов.

1.1. Основные понятия и терминология

Состав компьютерных систем и сетей

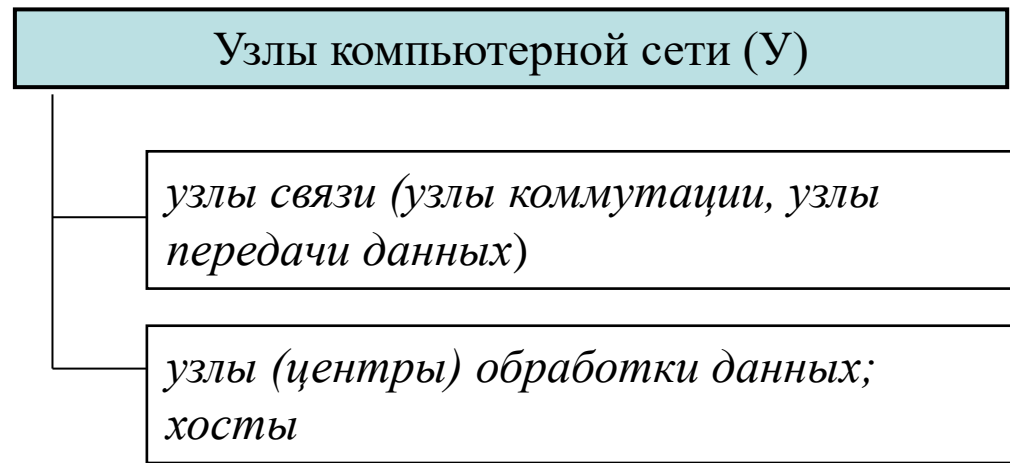
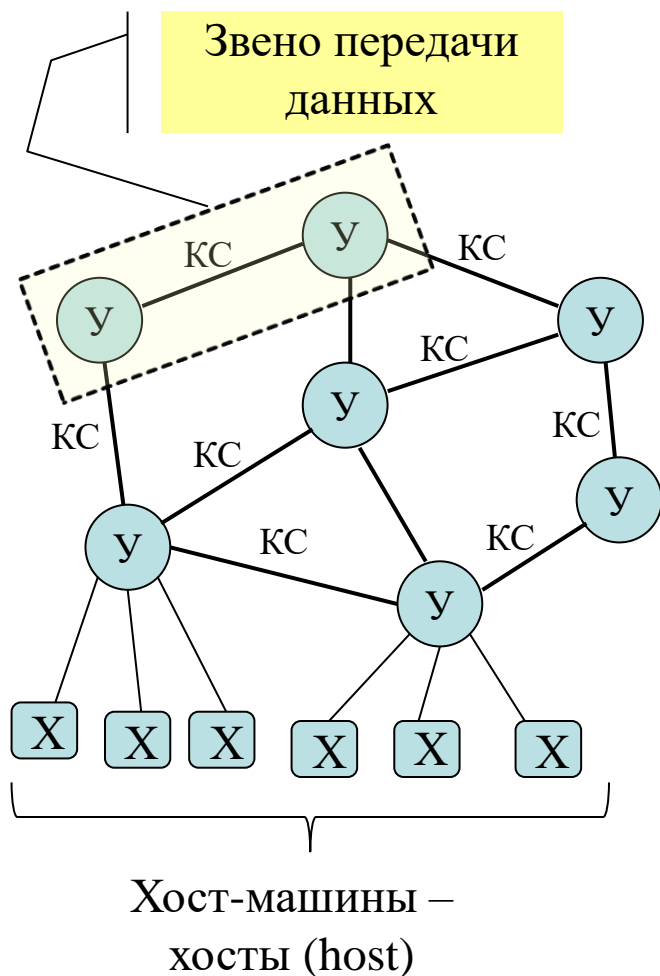


Архитектура компьютерной сети – множество технических и инженерных решений по структурной и функциональной организации сети, обеспечивающих определенную совокупность ее свойств и характеристик, рассматриваемую с точки зрения *пользователя* сети и отличающую данную конкретную сеть от любой другой сети.

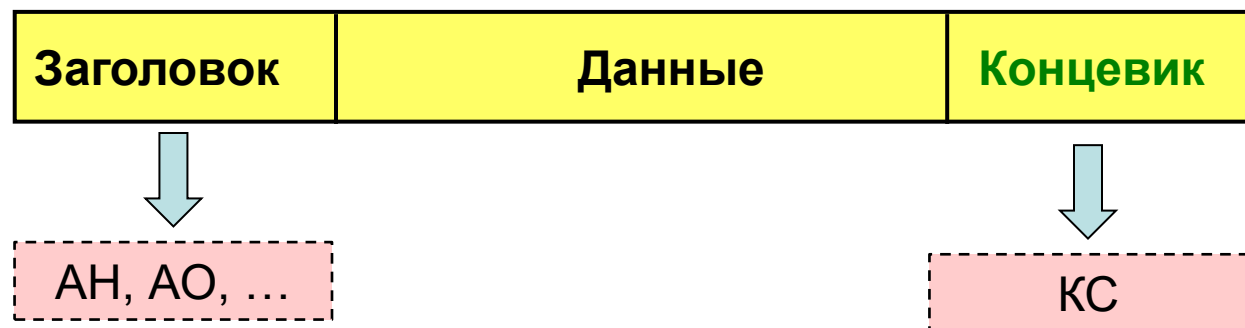
Технология компьютерной сети – способы организации передачи и обработки данных, обеспечивающие достижение требуемой эффективности сети.

1.2. Состав и типы компьютерных сетей

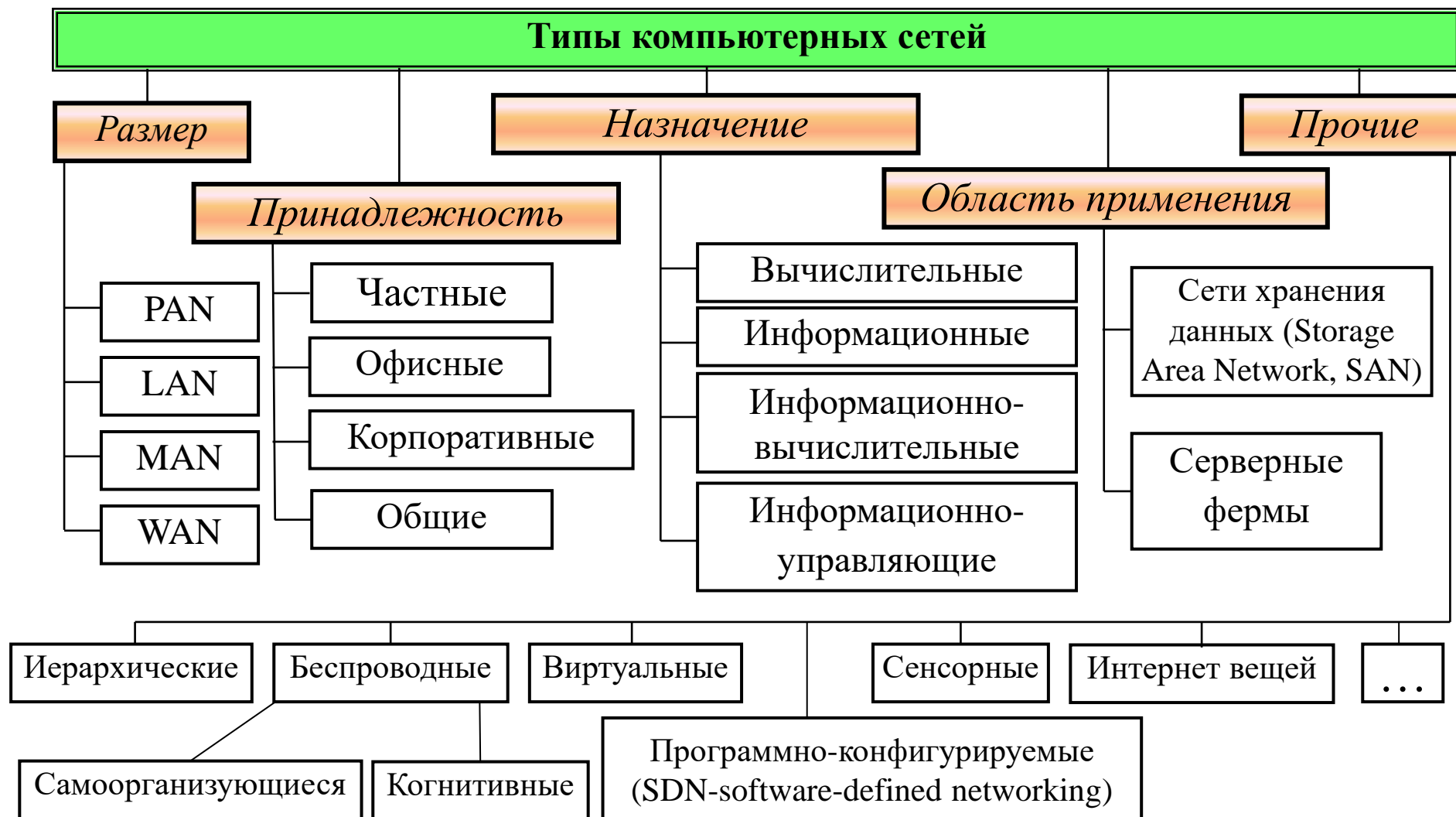
Элементы компьютерной сети



Структура (формат) сообщения:



Классификация компьютерных сетей



1.2. Состав и типы компьютерных сетей

Администрирование компьютерных сетей

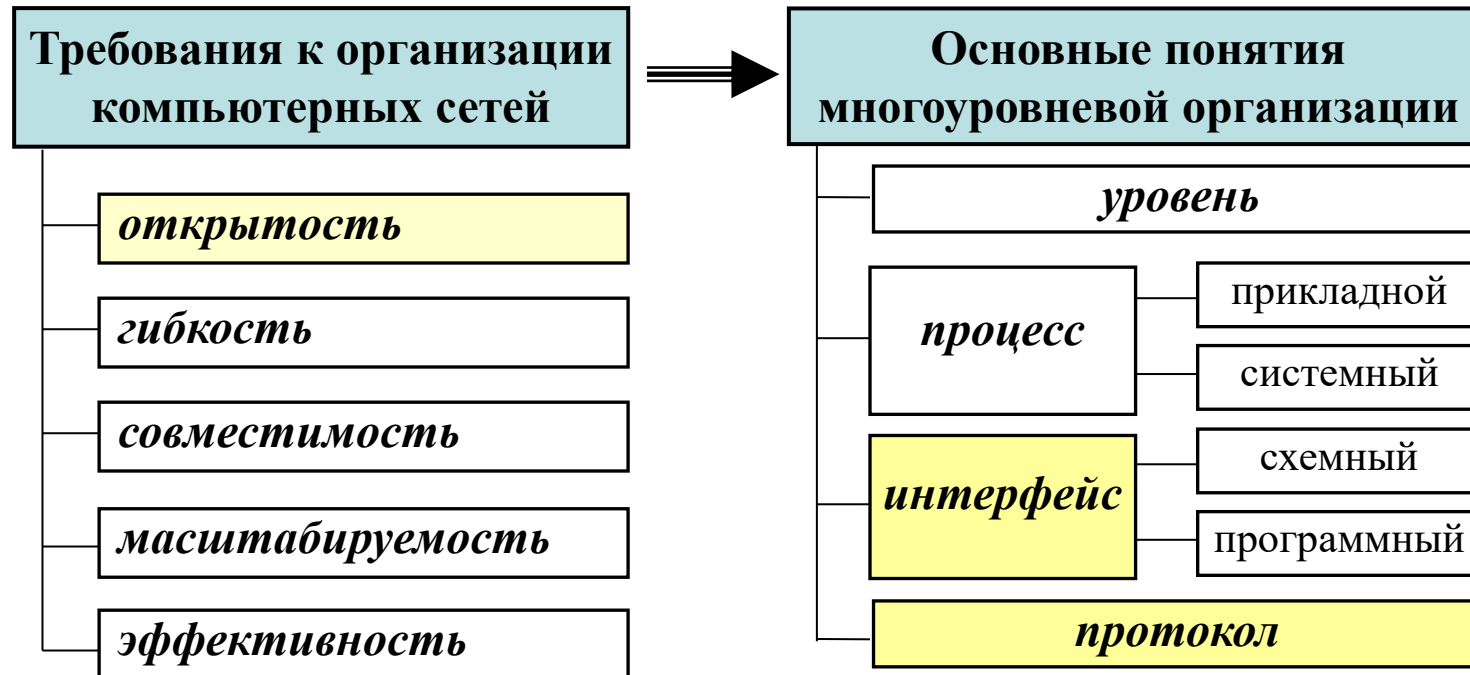


Основные функции администрирования сети:

- наблюдение за потоками данных;
- установка новых версий программного обеспечения;
- создание и поддержание таблиц маршрутизации и коммутации;
- диагностика состояния компонентов сети;
- контроль ошибок и устранение простых отказов;
- замена отказавших узлов резервными;
- реконфигурация сети;
- поддержка отказоустойчивости компьютерной сети;
- добавление новых пользователей;
- определение прав пользователей сети при их обращении к разным ресурсам: файлам, каталогам, принтерам и т.д.;
- ограничение возможностей пользователей в выполнении тех или иных системных действий.

1.3. Многоуровневая организация компьютерных сетей

Требования к организации компьютерных сетей

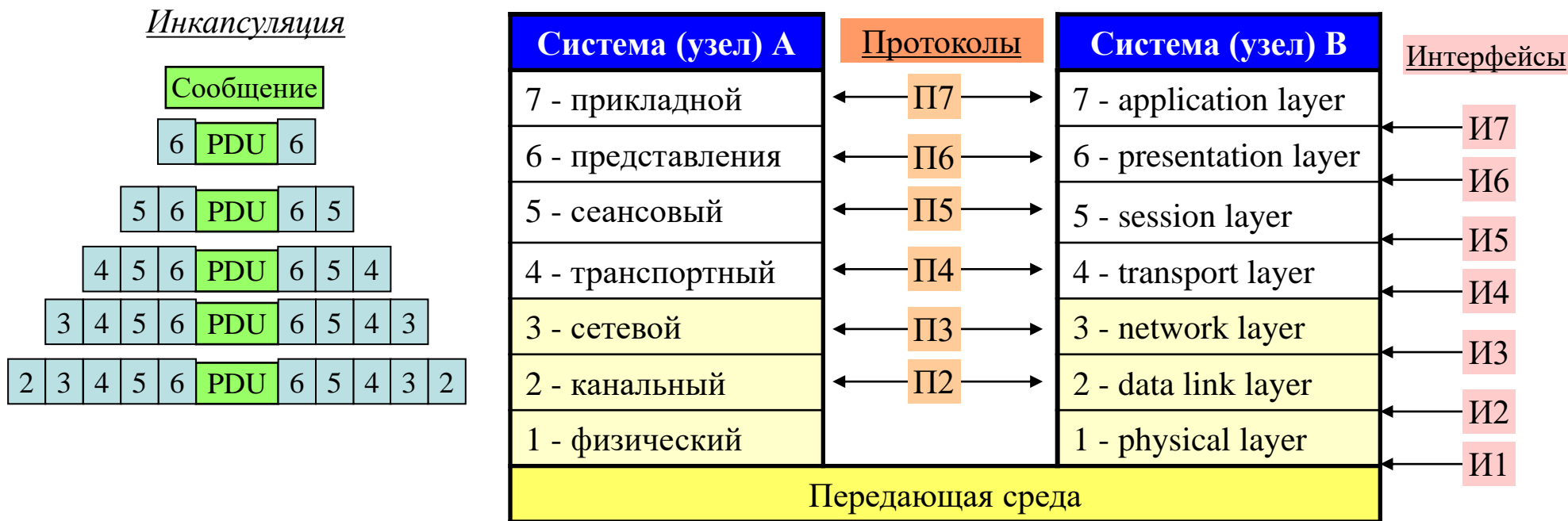


Уровень (layer) - понятие, позволяющее разделить всю совокупность функций обработки и передачи данных на несколько *иерархических групп*. На каждом уровне реализуются определенные *функции обработки и передачи данных* с помощью тех или иных *аппаратных и программных средств* сети.

Каждый уровень обслуживает вышележащий уровень и, в свою очередь, пользуется услугами нижележащего.

Модель взаимодействия открытых систем

Семиуровневая OSI-модель :



- **OSI-модель** (*Open Systems Interconnection*) - модель Взаимодействия Открытых Систем (ВОС)
- **ISO** (*International Standards Organization*) - Международная Организация по Стандартам (МОС)

PDU (Protocol Data Unit) - протокольный блок данных: сообщение (message), дейтаграмма (datagram), пакет (packet), кадр (frame)

1.3. Многоуровневая организация компьютерных сетей

Уровень 7 – прикладной:

- поддержка прикладных процессов и программ конечного пользователя;
- управление взаимодействием прикладных программ с различными объектами сети;
- формирование интерфейса между прикладным программным обеспечением и системой связи.

Уровень 6 – представления:

- управление информационным обменом;
- преобразование (перекодировка) данных во внутренний формат каждой ЭВМ и обратно;
- шифрование и дешифрование данных с целью защиты от несанкционированного доступа;
- сжатие данных, что особенно актуально при передаче мультимедийных данных.

Уровень 5 – сеансовый:

- установление соединения с адресатом, управление сеансом и разрыв соединения;
- координация связи прикладных программ на двух взаимодействующих рабочих станциях

Уровень 4 – транспортный (дейтаграмма; адрес процесса – порт):

- преобразование длинных сообщений в пакеты при их передаче в сети и обратное преобразование;
- контроль последовательности прохождения пакетов;
- регулирование трафика в сети;
- распознавание дублированных пакетов и их уничтожение

Уровень 3 – сетевой (пакет; сетевой адрес: 192.168.1. 4):

- *маршрутизация* и обработка ошибок;
- мультиплексирование и демultipлексирование пакетов;
- управление потоками данных в сети.

Уровень 2 – канальный (кадр; MAC-адрес: 00-19-45-A2-B4-DE):

- *управление доступом* сетевых устройств к среде передачи;
- увеличение надежности передачи данных в канале связи (до $10^{-8} - 10^{-9}$);
- управление потоком для предотвращения перегрузок и блокировок

Уровень 1 – физический (достоверность передачи по ЭЛС: $10^{-4} - 10^{-6}$):

- подключение и отключение канала связи;
- кодирование / декодирование данных и модуляция / демодуляция сигнала;
- формирование и *передача физических сигналов*.

IEEE-модель локальных сетей

IEEE-модель :

Уровни OSI-модели	
7 - прикладной	
6 - представления	
5 - сеансовый	Подуровни IEEE- модели
4 - транспортный	
3 - сетевой	
2 - канальный	
	LLC
	MAC
1 - физический	

Необходимость деления на подуровни:

- увеличение числа функций;
- предоставление дополнительных услуг.

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) -

Институт инженеров по электротехнике и электронике

MAC (*Medium Access Control*) – управление доступом к среде передачи

MAC-адрес: **01-25-AF-98-DC-07**

LLC (*Logical Link Control*) – управление логическим соединением

предоставляет сервис трех типов:

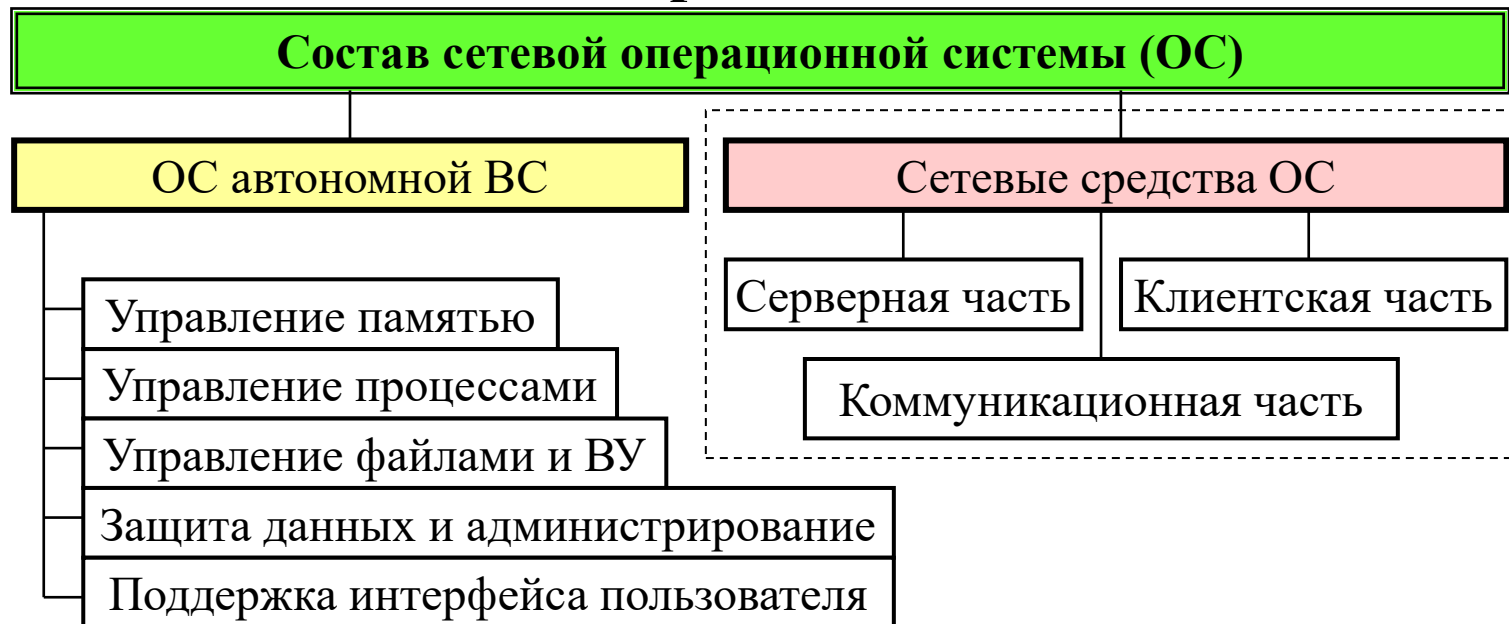
- 1) без установления соединения и без подтверждения доставки;
- 2) без установления соединения с подтверждением доставки;
- 3) сервис с установлением соединения.

Протокольные блоки данных (PDU)

Уровни OSI-модели		PDU	
7	Прикладной	<i>Сообщение</i>	Message
...
4	Транспортный	<i>Дейтаграмма</i>	Datagram
3	Сетевой	<i>Пакет</i>	Packet
2	Канальный	<i>Кадр</i>	Frame

Сегмент, поток,
ячейка (в АТМ-сетях)

Сетевая операционная система



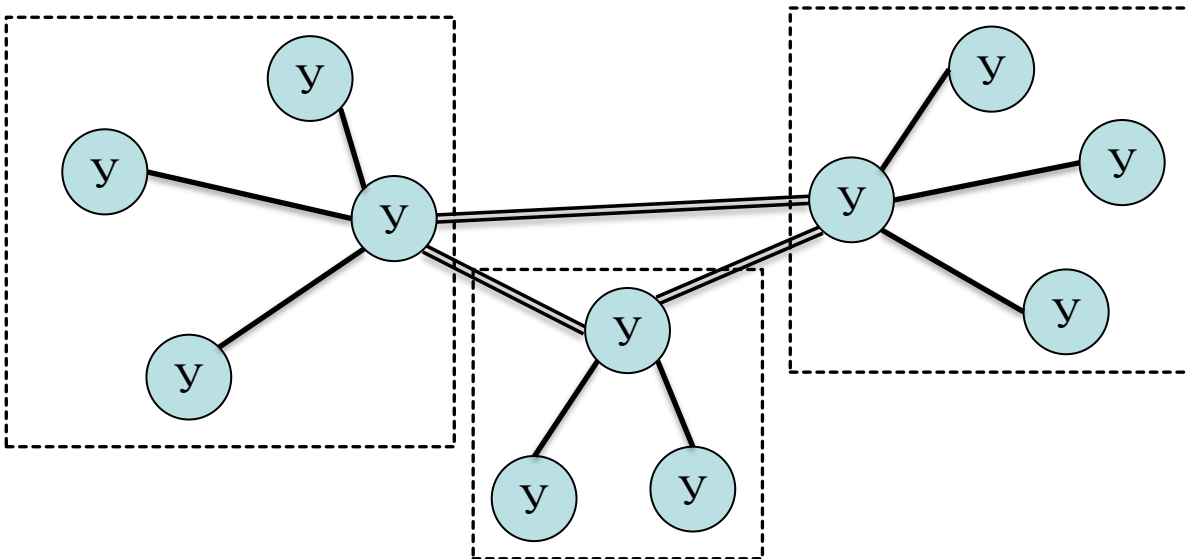
1.4. Структурная организация компьютерных сетей

Типовые топологии

Структурная организация телекоммуникационной сети (ТКС)

определяется:

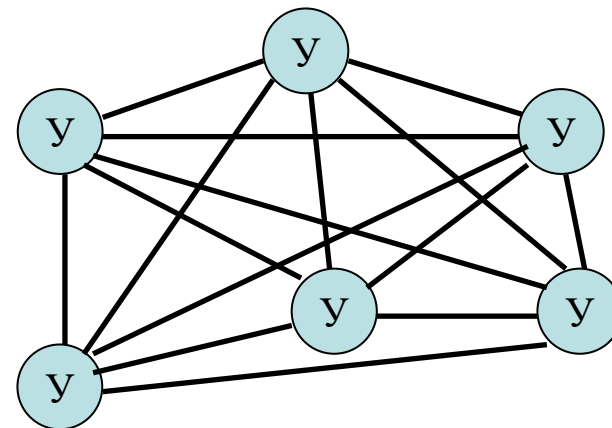
- *составом узлов* (количество и типы узлов ТКС);
- *топологией* ТКС;
- *производительностью узлов связи и пропускной способностью каналов связи.*



Следует различать: **физическую (структурную) топологию;**
логическую (функциональную) топологию.

Основные топологии:

- «общая шина»;
- полносвязная,
- «кольцо»,
- «дерево»,
- «звезда» (узловая),
- смешанная,
- многосвязная.



1.4. Структурная организация компьютерных сетей

Сравнительный анализ топологий

Сравнительный анализ топологий СПД проводится на основе следующих признаков:

- **сложность** (простота) структурной и функциональной организации;
- **надежность**, определяемая наличием альтернативных путей;
- **производительность** сети (возможное снижение эффективной скорости передачи данных из-за конфликтов);
- **время доставки** сообщений, например в хопах (hop);
- **стоимость**, зависящая как от состава оборудования, так и от сложности реализации.

Показатель	Топология						
	ОШ	Звезда	Дерево	Кольцо	Полно-связная	Смешанная	Много-связная
Простота	1	2	2	3	5	4	4
Стоимость	1	2	2	3	5	4	4
Надёжность	5	4	4	3	1	2	2
Производит.	5	4	4	3	1	2	2
Время дост.	3	2	4	5	1	3	3

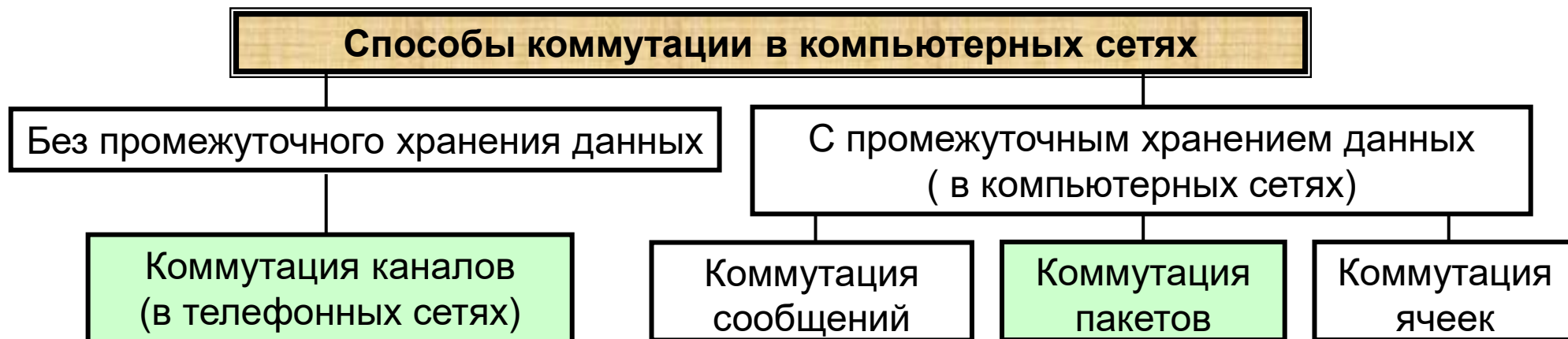
1.5. Функциональная организация компьютерных сетей



Функциональная организация процесса передачи данных в компьютерной сети определяется:

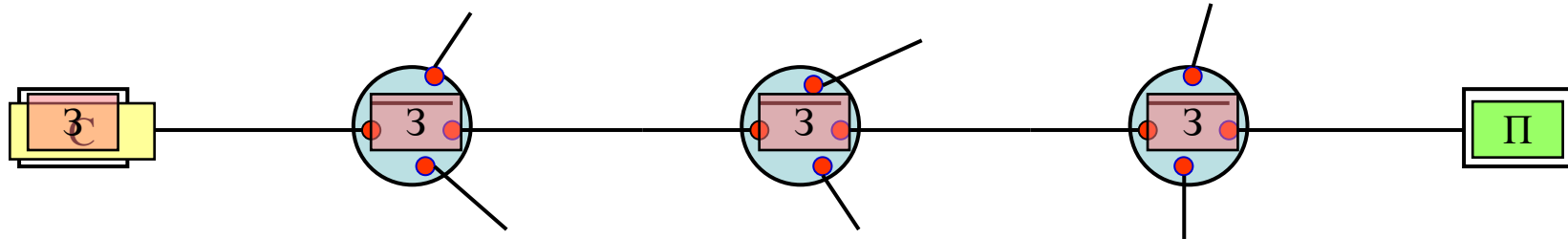
- *способом установления соединения* между абонентами сети – **способом коммутации**;
- *методами формирования трафика* - **мультиплексирование**;
- *методами управления трафиком* – **маршрутизация, кэширование, приоритезация**, обеспечивающие требуемое качество передачи данных.

Коммутация



Коммутация каналов

Принцип коммутации каналов (КК)



Достоинства КК:

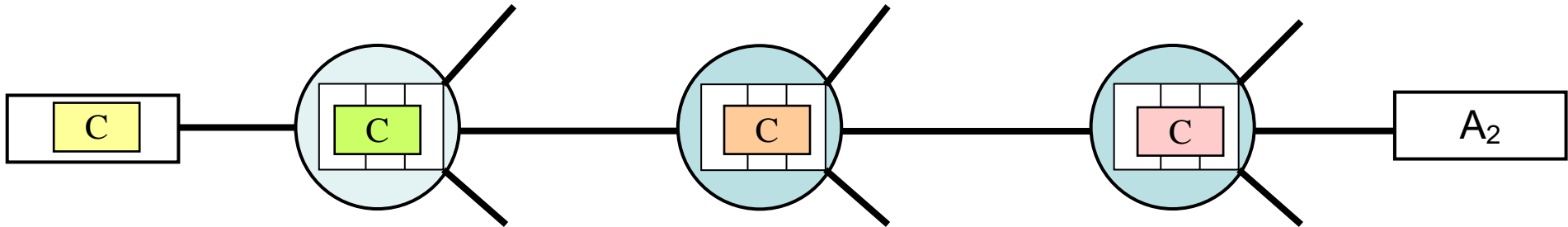
- возможность использования существующих линий связи *телефонной сети*;
- *не требуется память* в транзитных узлах для хранения сообщений;
- высокая эффективность при передаче *больших объемов данных*.

Недостатки КК:

- каналы связи должны иметь *одинаковые пропускные способности* на всем пути передачи;
- *большие накладные расходы* на установление соединения;
- низкое качество телефонных каналов и, как следствие *невысокие скорости передачи данных*.

Коммутация сообщений

Принцип коммутации сообщений (КС)



Достоинства КС:

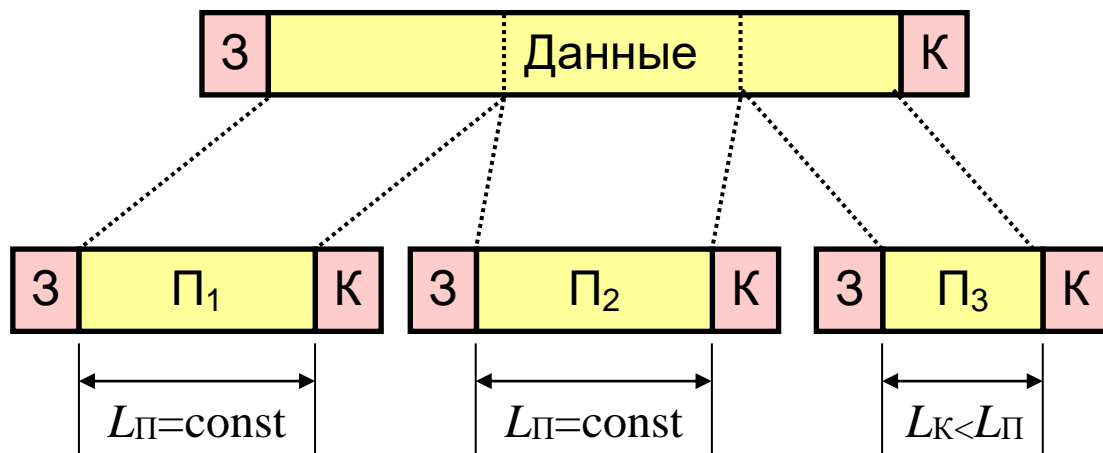
- не требуется предварительное установление соединения, что существенно *снижает накладные расходы*;
- каналы связи на всем пути передачи могут иметь *разные пропускные способности*;
- в промежуточных узлах происходит *регенерация* передаваемых сигналов.

Недостатки КС:

- необходимость хранения передаваемых сообщений в промежуточных узлах требует *значительной ёмкости памяти* при разных длинах передаваемых сообщений;
- *задержка в промежуточных узлах* может оказаться значительной;
- *монополизация среды передачи* длинными сообщениями.

Коммутация пакетов

Принцип коммутации пакетов (КП)

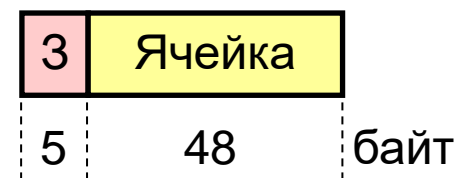


Достоинства КП:

- время доставки сообщений меньше, чем при коммутации сообщений;
- более эффективное использование буферной памяти;
- более эффективная организация надежной передачи данных;
- не монополизирована среда передачи;
- меньше задержка пакетов в узлах

Принцип коммутации ячеек (КЯ)

В АТМ-технологии:



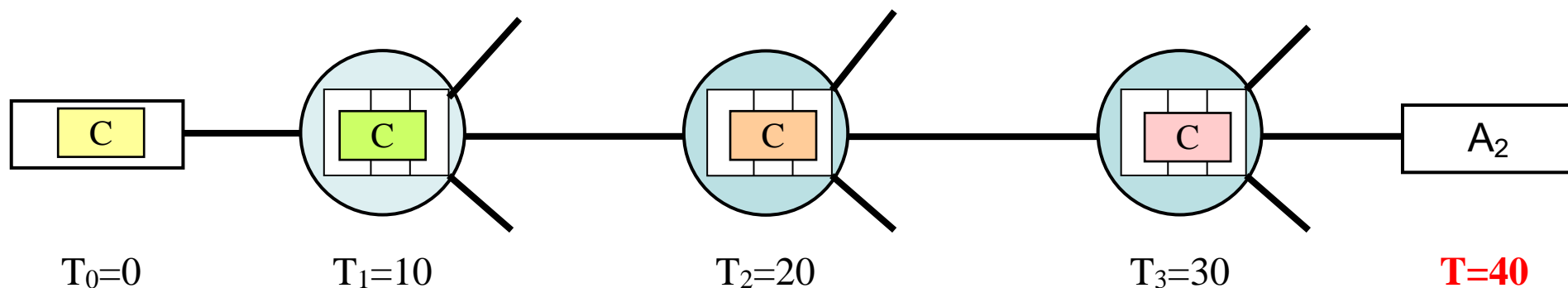
Недостатки КП:

- более высокие накладные расходы на анализ заголовков всех пакетов сообщения;
- необходимость сборки сообщения из пакетов в узле назначения.

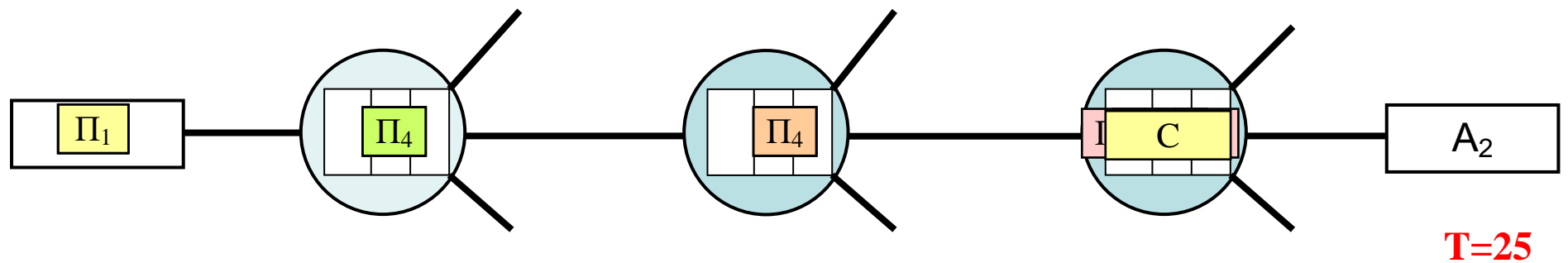
1.5. Функциональная организация компьютерных сетей

Сравнительный анализ коммутации сообщений и коммутации пакетов

Коммутация сообщений



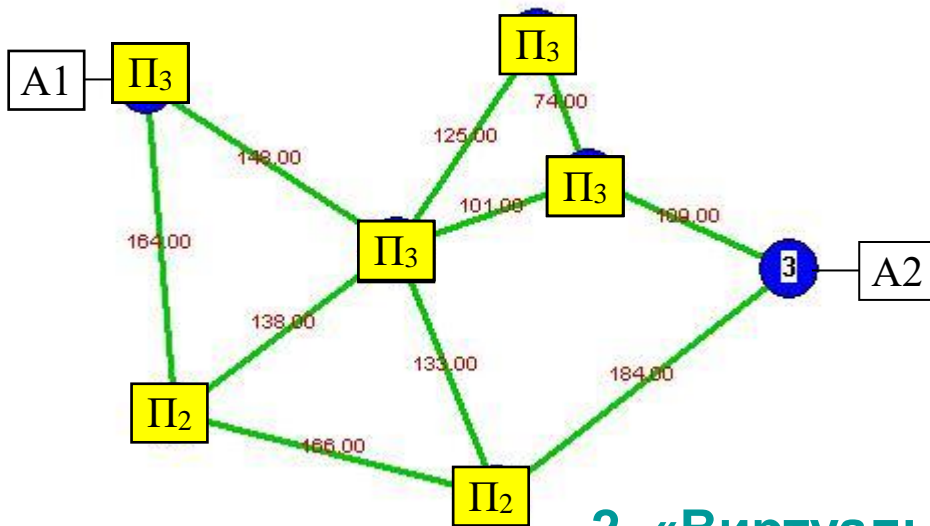
Коммутация пакетов (сообщение разделено на 4 пакета)



Способы передачи пакетов

1. Дейтаграммный:

- а) без установления соединения;
- б) с установлением соединения



Достоинства:

- *простота* организации и реализации передачи данных;
- *каждый пакет* выбирает *наилучший путь*;
- с установлением/ без установления соединения.

Недостатки:

- большое время *ожидания* в конечном узле прихода всех пакетов для сборки сообщения;
- произвольный порядок прибытия в конечный узел;
- возможность *переполнения* буферной памяти.

2. «Виртуальный канал»

Достоинства:

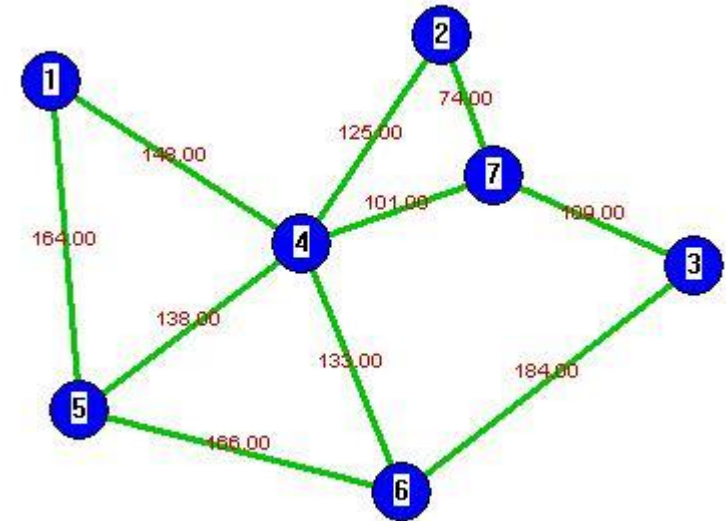
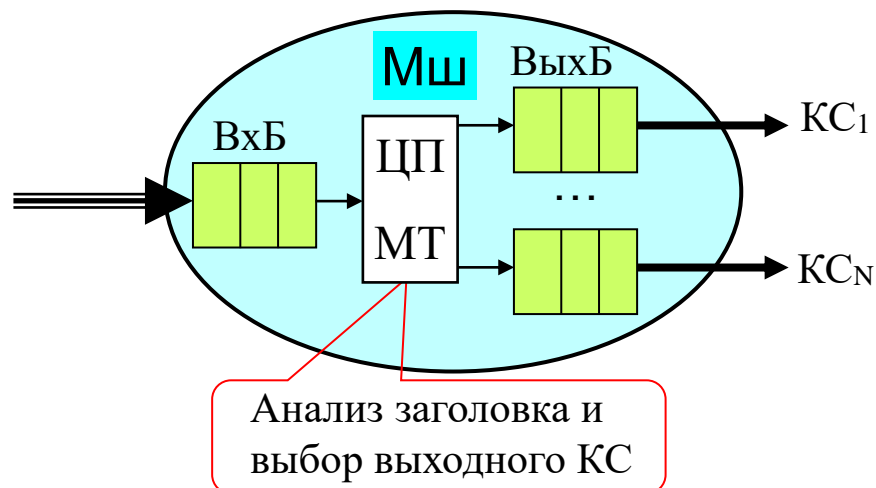
- меньшие задержки в узлах сети за счёт резервирования ресурсов;
- небольшое время ожидания в конечном узле;
- более эффективное использование буферной памяти узлов сети.

Недостатки:

- наличие *накладных расходов* (издержек) на **установление соединения**;
- неэффективное использование ресурсов сети, поскольку они резервируются на все время взаимодействия абонентов (сеанса).

Принципы маршрутизации

Методы маршрутизации



Маршрутная таблица (МТ) узла 4

Адрес назначения	Осн. путь	Альт. путь	Метрика
Хост 1	1	5	0
Хост 2	2	7	0
Хост 3	6	7	1
Хост 5	5	1	0
Хост 6	6	5	0
Хост 7	7	2	0

Маршрутизация по предыдущему опыту

АП	АО	Р	...		
y_{10}	y_1	0	...	Данные	КС

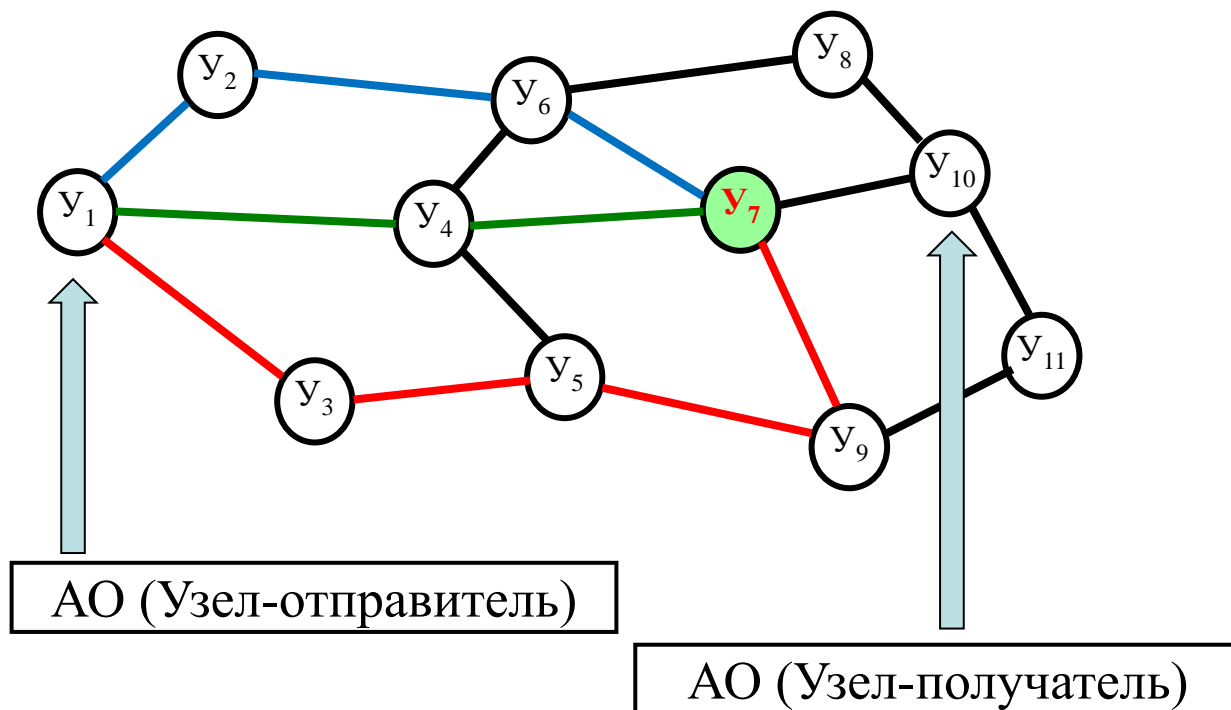


Таблица маршрутизации узла y_7 (1)

АН	АСУ	Расстояние
y_1	y_9	3
...

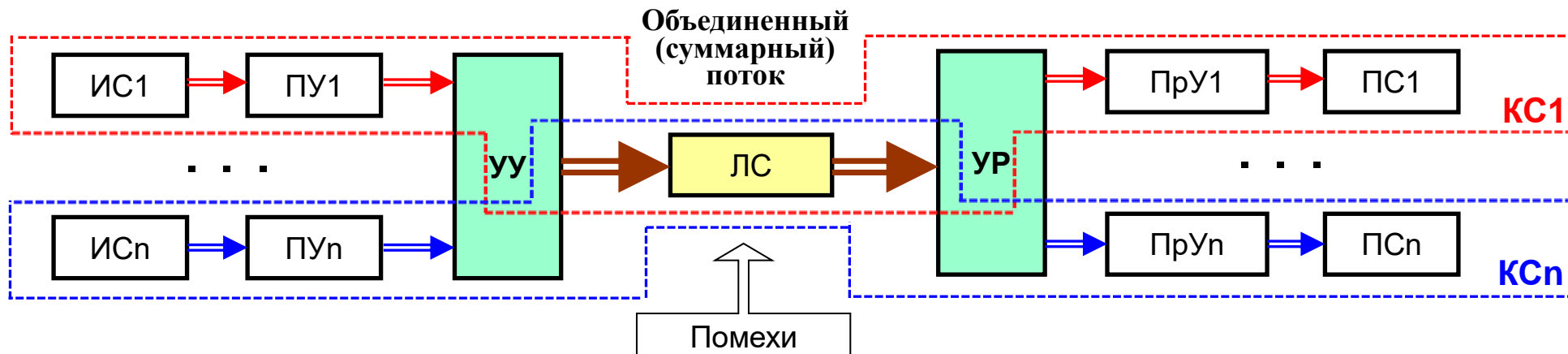
Таблица маршрутизации узла y_7 (2)

АН	АСУ	Расстояние
y_1	y_6	2
...

Таблица маршрутизации узла y_7 (3)

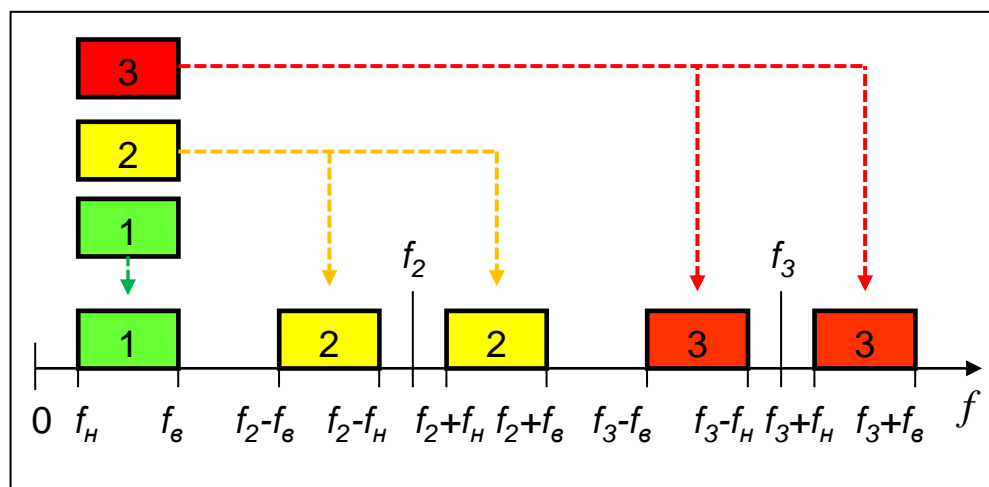
АН	АСУ	Расстояние
y_1	y_4	1
...

Методы уплотнения каналов связи

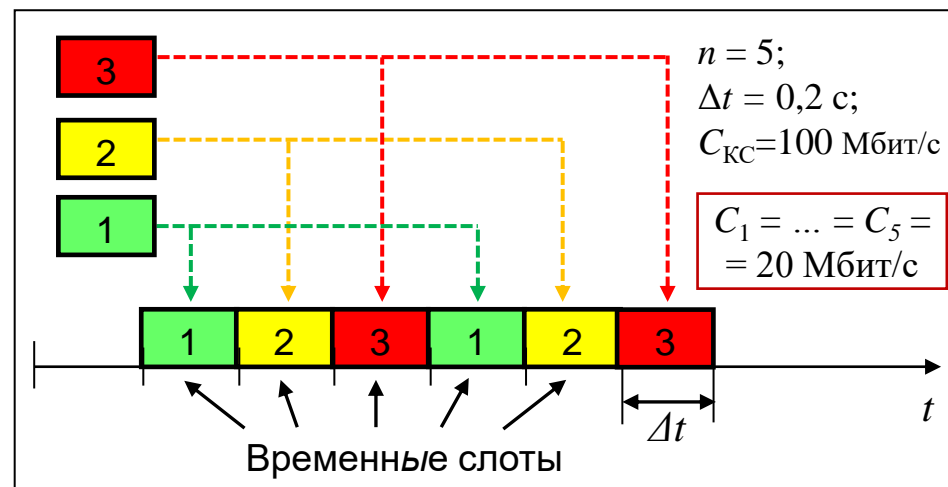


Традиционные методы уплотнения каналов:

1) частотный



2) временной



Методы мультиплексирования

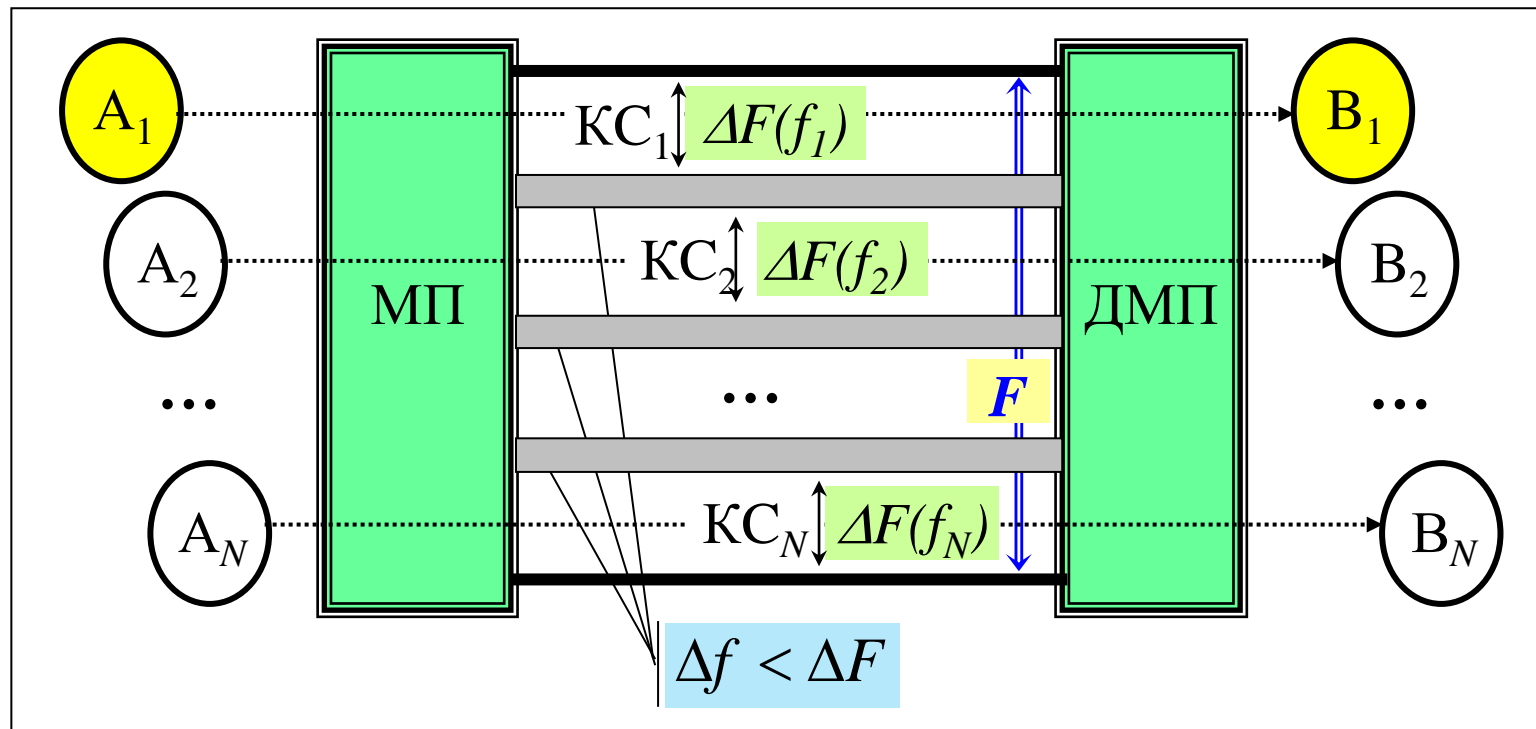
Методы мультиплексирования в компьютерных сетях

Частотное (FDM)

Временное (TDM)

Волновое (WDM)

Частотное мультиплексирование (Frequency Division Multiplexing – FDM)

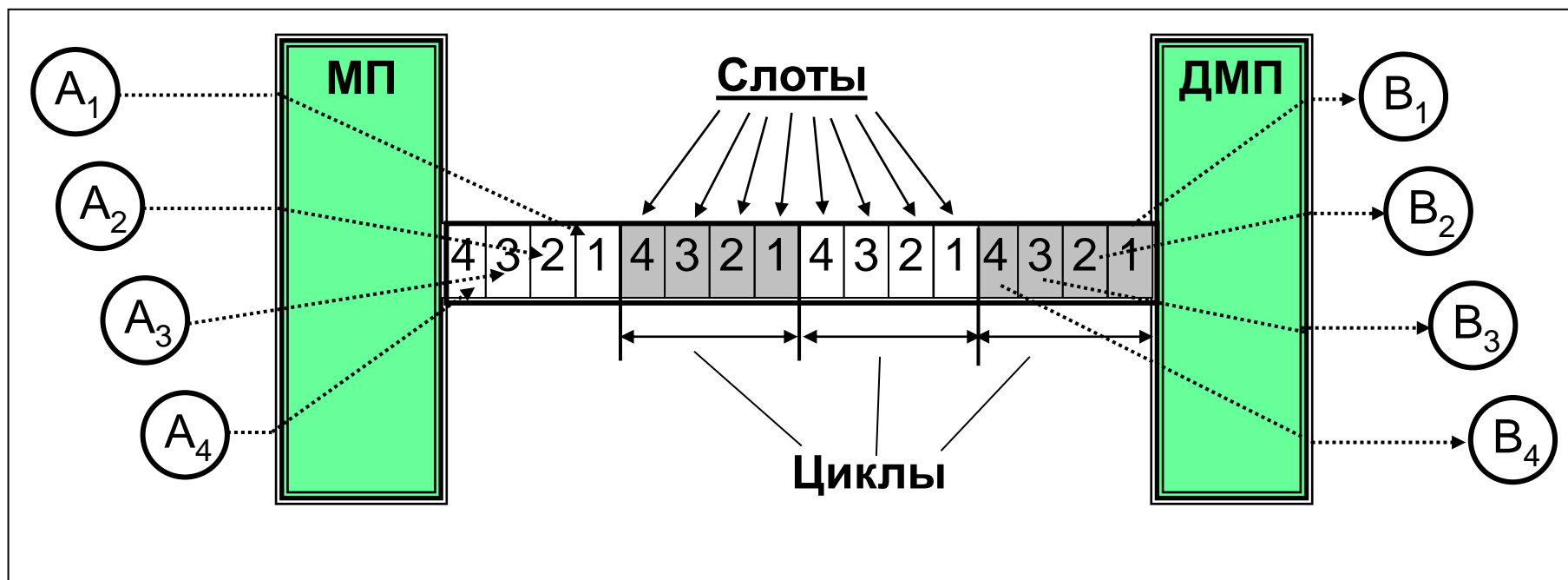


Методы мультиплексирования

Временное мультиплексирование (Time Division Multiplexing – TDM)

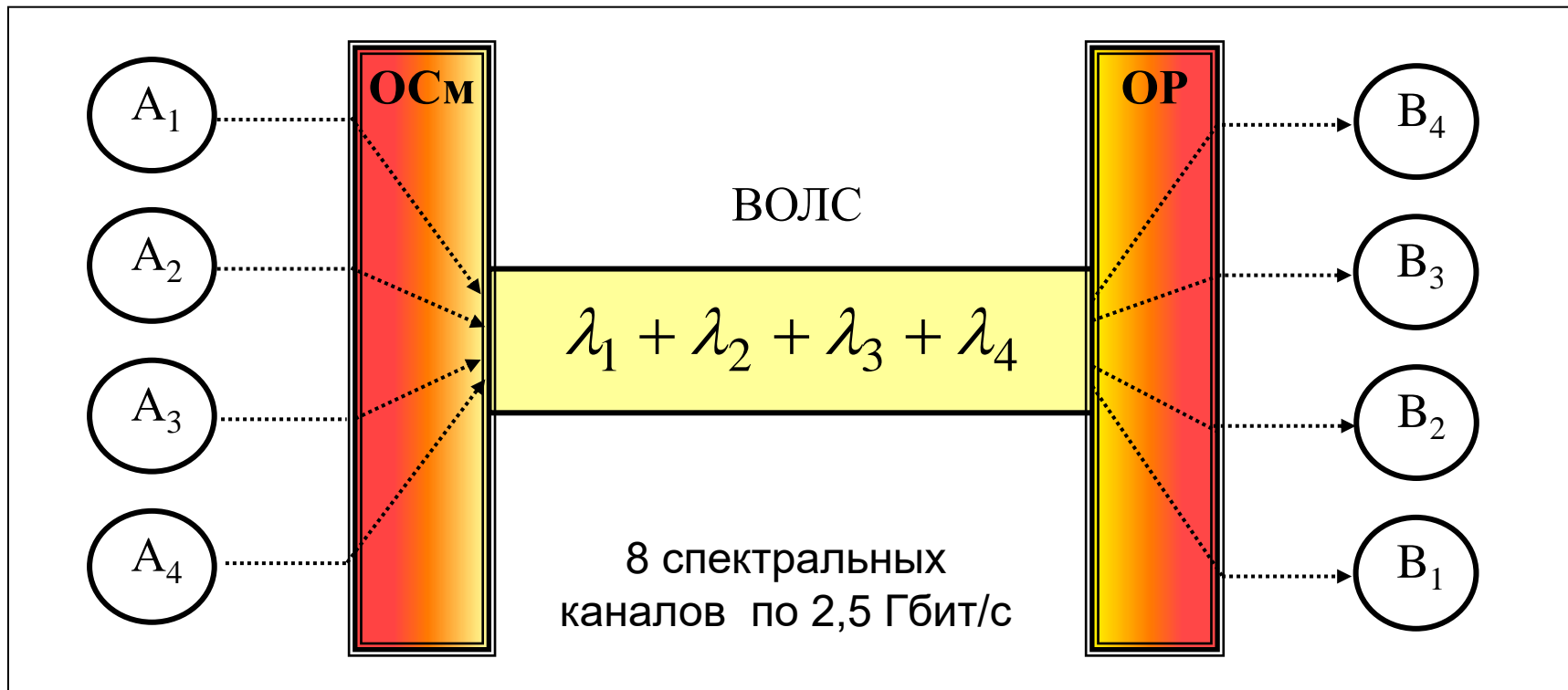
Статическое (синхронное)

Статистическое (асинхронное)



Методы мультиплексирования

Волновое мультиплексирование – спектральное уплотнение (Wavelength Division Multiplexing – WDM)



Уплотнённое волновое мультиплексирование – DWDM (Dense WDM):
16, 32 или 40 спектральных каналов по 10 Гбит/с

Задачи управления трафиком

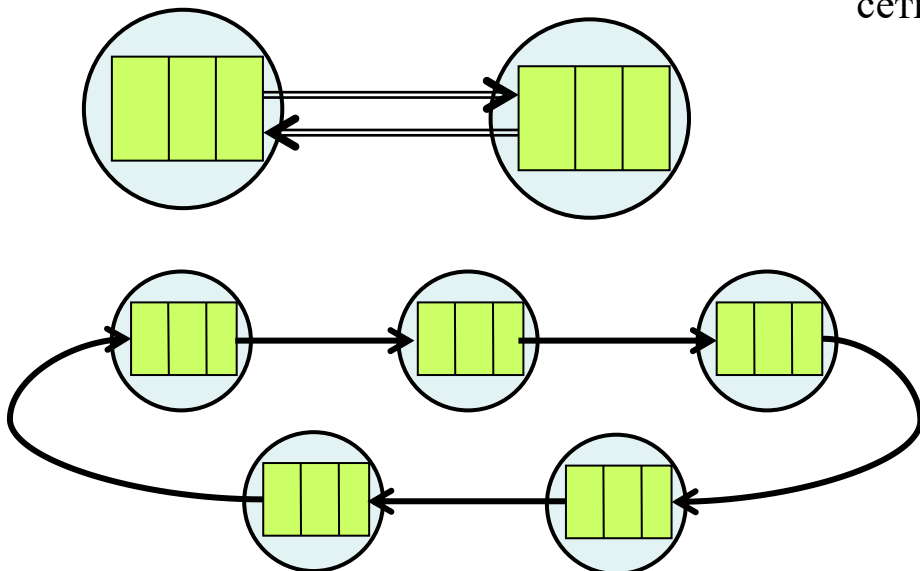
Особенности сетевого трафика:

- неоднородность потока данных;
- разные требования к качеству передачи данных разных типов;
- нестационарность трафика;
- возникновение периодов перегрузок.

Основные задачи управления трафиком:

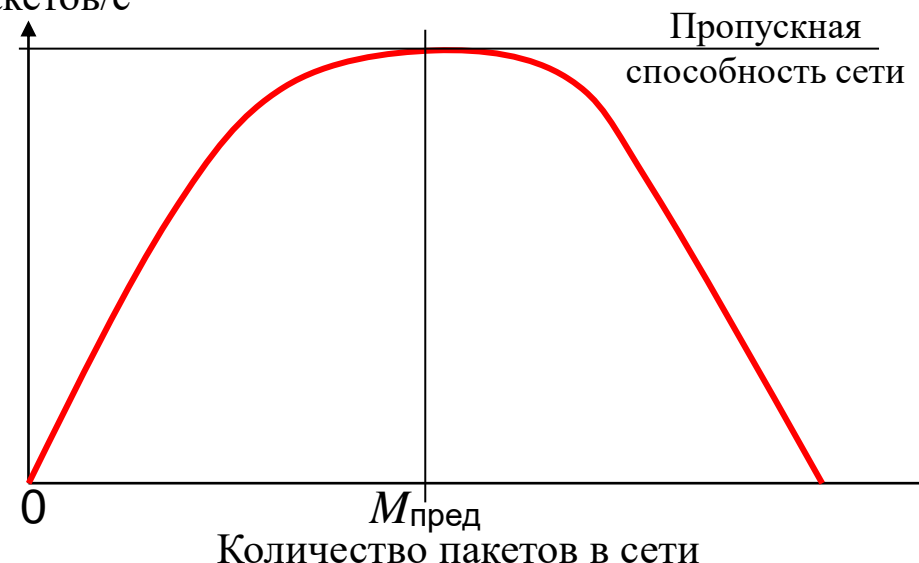
- малые задержки при передаче по сети;
- надежная передача данных (без потерь);
- эффективная загрузка оборудования (каналов и узлов) сети;
- предотвращение *блокировок* и *перегрузок*.

Блокировки в сети:



Производительность
сети, пакетов/с

Перегрузка в сети:



Управление трафиком на физическом уровне

На физическом уровне – разделение потоков битов:

- 1) указание в заголовке кадра его длины (недостаток – неустойчивость к помехам);
- 2) использование в качестве границы кадров запрещенных сигналов физического уровня;
- 3) использование в качестве границы кадров специальных стартовых и стоповых символов (байт) - байт-стаффинг;
- 4) использование в качестве границы кадров специальных последовательностей битов – бит-стаффинг (bit stuffing).

0111011011111111000010011111101000000101001011111001001

1000111111011100111010111100111110110000111111

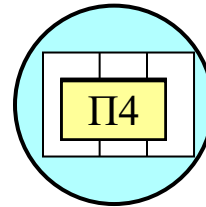
01111110 100011111011100111010111100111110011000011111011 01111110

001001111110100011111011100111010111100111110011000011111011011111100011

Управление трафиком на канальном уровне

На канальном уровне управление потоком в канале связи между двумя узлами реализуется за счет применения:

- механизма квитирования;
- механизма *тайм-аута*;
- механизма скользящего окна.



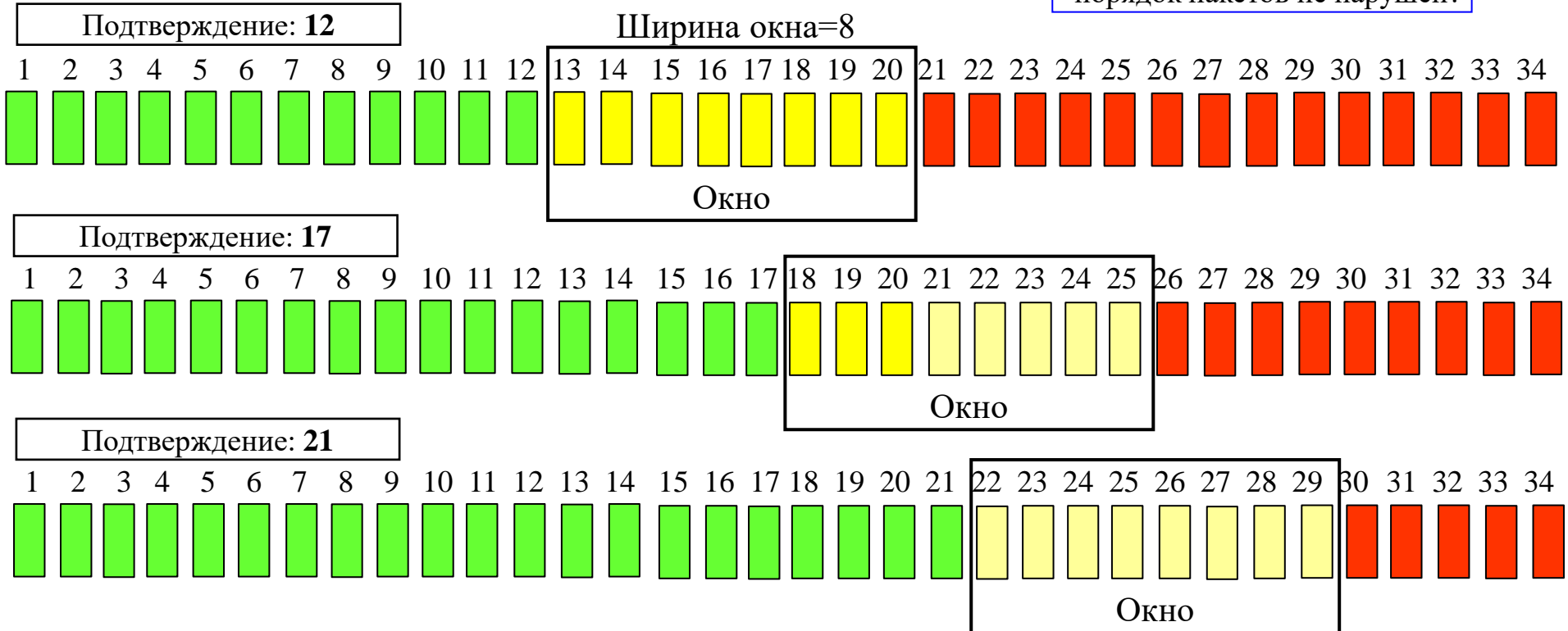
$T=0$

Ширина окна=4

Протоколы:
HDLC, LAP-M

Проверка:

- пакет не искажен?
- порядок пакетов не нарушен?



1.5. Функциональная организация компьютерных сетей

Управление трафиком на высших уровнях OSI-модели

На сетевом уровне управление трафиком в сети реализуется за счет:

- применения различных методов маршрутизации;
- установления приоритетов между различными типами трафика.

На транспортном уровне управление потоком между конечными узлами телекоммуникационной сети может быть реализован за счет:

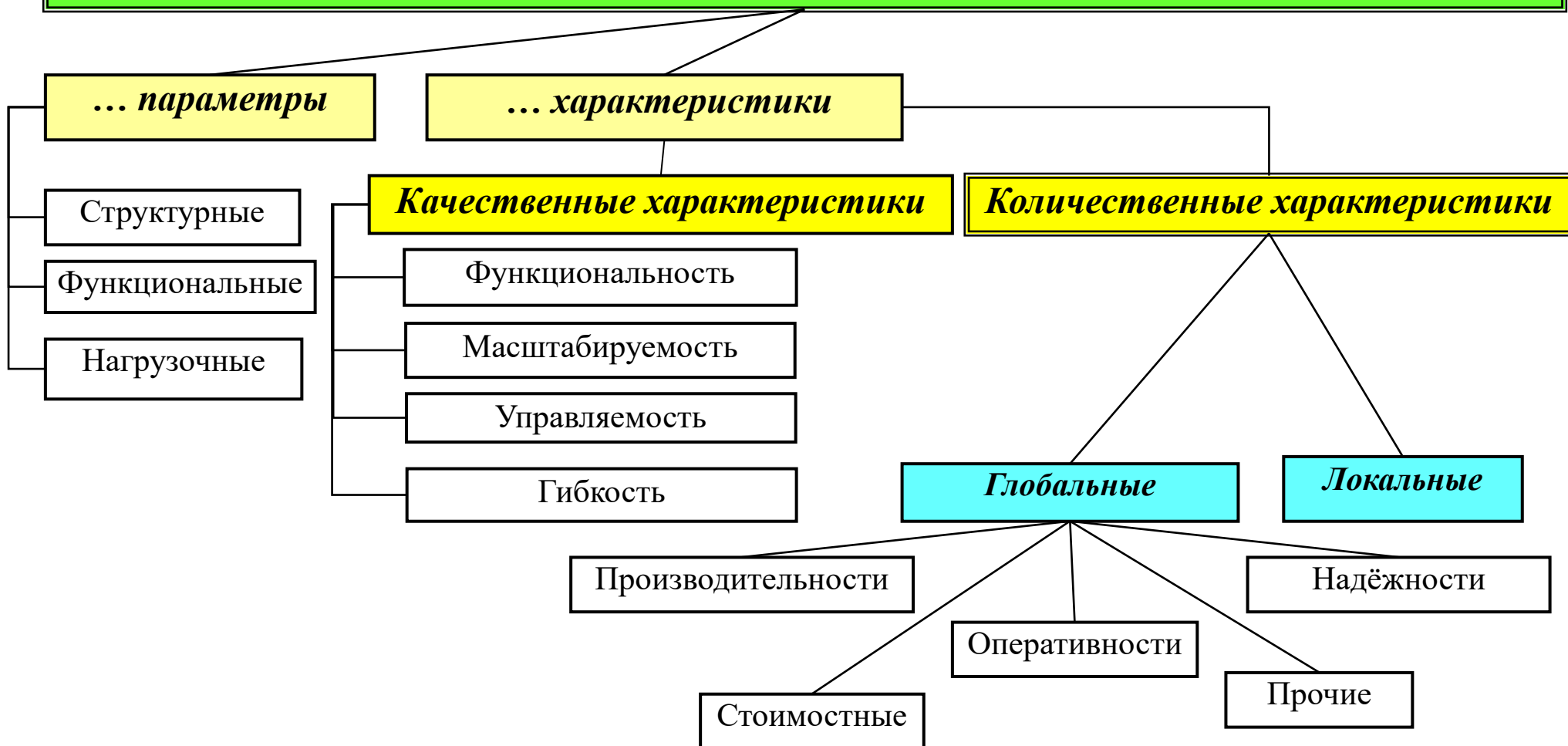
- квитирования на основе скользящего окна (например в протоколе TCP);
- установления приоритетов между различными типами трафика;
- ограничения поступающего от абонента трафика (например, когда скорость работы отправителя выше скорости получателя);
- ограничения доступа в СПД (изаритмический алгоритм).

На сеансовом уровне управление в коммутируемых сетях сеансом связи реализуется за счет:

- применения различных способов установления соединения между абонентами.

1.6. Параметры и характеристики компьютерных сетей

Для описания эффективности компьютерной сети используются ...



1.7. Сетевые протоколы

Стек протоколов – множество протоколов разных уровней одной сетевой технологии:

	OSI-модель	IEEE-модель		TCP/IP	XNS(IPX)	AppleTalk	DECnet	SNA
7	Прикладной	Прикладной		Прикладной	Прикладной	Представления	Прикладной (пользователь-ский)	Сервис транзакций
6	Представления	Представления			Контрольный		Сессионный	Сетевые приложения
5	Сеансовый (сессионный)	Сессионный				Контроль сессии		Контроль потока данных
4	Транспортный	Транспортный		Транспортный	Транспортный	Транспортный	Коммуникации "конец-связи"	Контроль передачи
3	Сетевой	Сетевой		Межсетевой	Межсетевой	Сетевой	Маршрутизаци-онный	Контроль маршрута
2	Канальный (передачи данных)	Каналь-ный	LLC	Сетевой интерфейс	Канальный интерфейс	Канальный	Канальный	Контроль канала
			MAC					
1	Физический	Физический						Физический



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО