

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Калужский филиал  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
**«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»**  
(КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Е.В. Красавин, Е.А. Черепков

## КОММУТАТОРЫ

Методические указания к лабораторной работе  
по дисциплине «Компьютерные сети»

Калуга – 2018


УДК 004.62  
ББК 32.972.1  
Б435

Методические указания составлены в соответствии с учебным планом КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана по направлению подготовки 09.03.04 «Программная инженерия» кафедры «Программного обеспечения ЭВМ, информационных технологий».

Методические указания рассмотрены и одобрены:

- Кафедрой «Программного обеспечения ЭВМ, информационных технологий» (ИУ4-КФ) протокол № 3 от «21» ноября 2018 г.

Зав. кафедрой ИУ4-КФ

 к.т.н., доцент Ю.Е. Гагарин


- Методической комиссией факультета ИУ-КФ протокол № 4 от «26» ноября 2018 г.

Председатель методической  
комиссии факультета ИУ-КФ

 к.т.н., доцент М.Ю. Адкин


- Методической комиссией  
КФ МГТУ им.Н.Э. Баумана протокол № 3 от «4» декабря 2018 г.

Председатель методической комиссии  
КФ МГТУ им.Н.Э. Баумана

 д.э.н., профессор О.Л. Перерва



Рецензент:

зав. кафедрой ИУ2-КФ  
«Информационные системы и сети»,  
к.т.н., доцент

 И.В. Чухраев

Авторы

к.т.н., доцент кафедры ИУ4-КФ  
ассистент кафедры ИУ4-КФ

 Е.В. Красавин  
 Е.А. Черепков

#### Аннотация

Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Компьютерные сети» содержат общие сведения о коммутаторах их функционале и технических характеристиках.

Предназначены для студентов 4-го курса бакалавриата КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по направлению подготовки 09.03.04 «Программная инженерия».

© Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018 г.

© Е.В. Красавин, Е.А. Черепков, 2018 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЯ.....	5
КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИЗУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ .....	6
ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФУНКЦИИ КОММУТАТОРОВ .....	8
ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ .....	36
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ .....	38
ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ .....	39
ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	40
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	40

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящие методические указания составлены в соответствии с программой проведения лабораторных работ по курсу «Компьютерные сети» на кафедре «Программное обеспечение ЭВМ, информационные технологии» факультета «Информатика и управление» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методические указания, ориентированные на студентов 4-го курса направления подготовки 09.03.04 «Программная инженерия», содержат базовые сведения о коммутаторах, их функционале и технических характеристиках

Методические указания составлены для ознакомления студентов с концентраторами и овладения начальными навыками по организации их работы. Для выполнения лабораторной работы студенту необходимы минимальные знания о концентраторах, коммутаторах и их взаимодействии.

## **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ, ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЯ**

Целью выполнения лабораторной работы является формирование практических навыков по применению коммутаторов для построения локальных компьютерных сетей.

Основными задачами выполнения лабораторной работы являются:

1. Выявить характеристики, влияющие на производительность коммутаторов;
2. Разобрать типовые схемы применения коммутаторов в локальных сетях.

Результатами работы являются:

1. Настроенная рабочая конфигурация сети.
2. Подготовленный отчет.

## **КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИЗУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ**

Сетевой коммутатор (от англ. switch — переключатель) — устройство, предназначенное для соединения нескольких узлов компьютерной сети в пределах одного или нескольких сегментов сети. Коммутатор работает на канальном (втором) уровне модели OSI. Коммутаторы были разработаны с использованием мостовых технологий и часто рассматриваются как многопортовые мосты. Для соединения нескольких сетей на основе сетевого уровня служат маршрутизаторы (3 уровень OSI).

В отличие от концентратора (1 уровень OSI), который распространяет трафик от одного подключённого устройства ко всем остальным, коммутатор передаёт данные только непосредственно получателю (исключение составляет широковещательный трафик всем узлам сети и трафик для устройств, для которых неизвестен исходящий порт коммутатора). Это повышает производительность и безопасность сети, избавляя остальные сегменты сети от необходимости (и возможности) обрабатывать данные, которые им не предназначались.

### **Принцип работы коммутатора**

Коммутатор хранит в памяти (т.н. ассоциативной памяти) таблицу коммутации, в которой указывается соответствие MAC-адреса узла порту коммутатора. При включении коммутатора эта таблица пуста, и он работает в режиме обучения. В этом режиме поступающие на какой-либо порт данные передаются на все остальные порты коммутатора. При этом коммутатор анализирует фреймы (кадры) и, определив MAC-адрес хоста-отправителя, заносит его в таблицу на некоторое время. Впоследствии, если на один из портов коммутатора поступит кадр, предназначенный для хоста, MAC-адрес которого уже есть в таблице, то этот кадр будет передан только через порт, указанный в таблице. Если MAC-адрес хоста-получателя не ассоциирован с каким-либо портом коммутатора, то кадр будет отправлен на все порты, за

исключением того порта, с которого он был получен. Со временем коммутатор строит таблицу для всех активных MAC-адресов, в результате трафик локализуется.

Стоит отметить малую латентность (задержку) и высокую скорость пересылки на каждом порту интерфейса.

## **Режимы коммутации**

Существует три способа коммутации. Каждый из них — это комбинация таких параметров, как время ожидания и надёжность передачи.

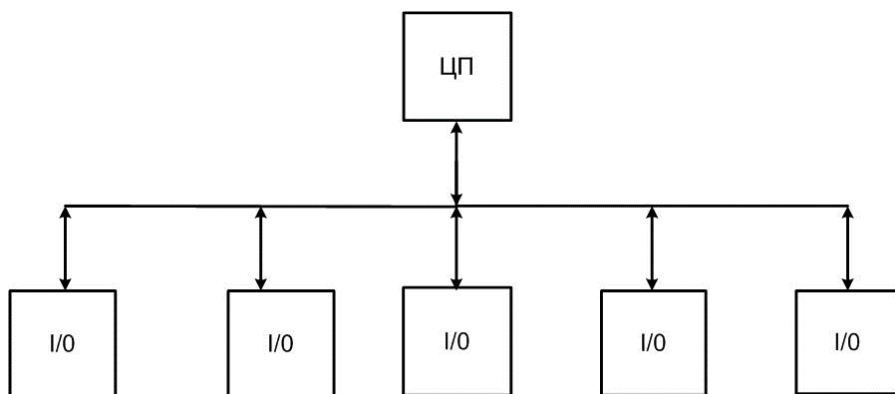
1. С промежуточным хранением (Store and Forward). Коммутатор читает всю информацию в кадре, проверяет его на отсутствие ошибок, выбирает порт коммутации и после этого посылает в него кадр.
2. Сквозной (cut-through). Коммутатор считывает в кадре только адрес назначения и после выполняет коммутацию. Этот режим уменьшает задержки при передаче, но в нём нет метода обнаружения ошибок.
3. Бесфрагментный (fragment-free) или гибридный. Этот режим является модификацией сквозного режима. Передача осуществляется после фильтрации фрагментов коллизий (первые 64 байта кадра анализируются на наличие ошибки и при её отсутствии кадр обрабатывается в сквозном режиме).

Задержка, связанная с «принятием коммутатором решения», добавляется к времени, которое требуется кадру для входа на порт коммутатора и выхода с него, и вместе с ним определяет общую задержку коммутатора.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФУНКЦИИ КОММУТАТОРОВ

### Особенности технической реализации коммутаторов

После того как технология коммутации привлекла общее внимание и получила высокие оценки специалистов, многие компании занялись реализацией этой технологии в своих устройствах, применяя для этого различные технические решения. Многие коммутаторы первого поколения были похожи на маршрутизаторы, то есть основывались на центральном процессоре общего назначения, связанном с интерфейсными портами по внутренней скоростной шине (рис. 1). Однако это были скорее пробные устройства, предназначенные для освоения самой компанией технологии коммутации, а не для завоевания рынка.



**Рис.1.** Коммутатор на процессоре общего назначения

Основным недостатком таких коммутаторов была их низкая скорость. Универсальный процессор никак не мог справиться с большим объемом специализированных операций по пересылке кадров между интерфейсными модулями.



Сегодня все коммутаторы используют заказные специализированные БИС — ASIC, которые оптимизированы для выполнения основных операций коммутации. Часто в одном коммутаторе используется несколько специализированных БИС, каждая из которых выполняет функционально законченную часть операций. Сравнительно низкая стоимость современных коммутаторов по сравнению с их предшественниками 3-5-летней давности объясняется массовым характером производства основных БИС, на которых каждая компания строит свои коммутаторы.

Кроме процессорных микросхем для успешной неблокирующей работы коммутатору нужно также иметь быстродействующий узел для передачи кадров между процессорными микросхемами портов.

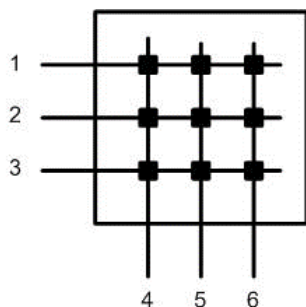
В настоящее время коммутаторы используют в качестве базовой одну из трех схем, на которой строится такой узел обмена:

- [коммутационная матрица](#);
- [общая шина](#);
- [разделяемая многовходовая память](#).

Часто эти три способа взаимодействия [комбинируются в одном коммутаторе](#).

### **Коммутаторы на основе коммутационной матрицы**

Коммутационная матрица обеспечивает основной и самый быстрый способ взаимодействия процессоров портов, именно он был реализован в первом промышленном коммутаторе локальных сетей. Однако реализация матрицы возможна только для определенного числа портов, причем сложность схемы возрастает пропорционально квадрату количества портов коммутатора (рис. 2).



**Рис.2.** Коммутационная матрица

Матрица состоит из трех уровней двоичных переключателей, которые соединяют свой вход с одним из двух выходов в зависимости от значения бита тэга. Переключатели первого уровня управляются первым битом тэга, второго — вторым, а третьего — третьим.

Матрица может быть реализована и по-другому, на основании комбинационных схем другого типа, но ее особенностью все равно остается технология коммутации физических каналов. Известным недостатком этой технологии является отсутствие буферизации данных внутри коммутационной матрицы — если составной канал невозможно построить из-за занятости выходного порта или промежуточного коммутационного элемента, то данные должны накапливаться в их источнике, в данном случае — во входном блоке порта, принявшего кадр. Основные достоинства таких матриц — высокая скорость коммутации и регулярная структура, которую удобно реализовывать в интегральных микросхемах. Зато после реализации матрицы  $N \times N$  в составе БИС проявляется еще один ее недостаток — сложность наращивания числа коммутируемых портов.

### **Коммутаторы с общей шиной**

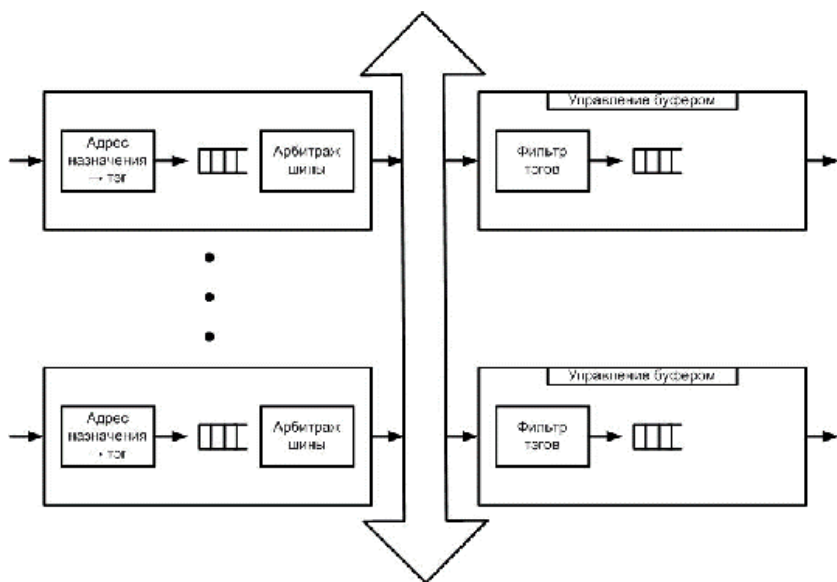
В коммутаторах с общей шиной процессоры портов связывают высокоскоростной шиной, используемой в режиме разделения времени.

Пример такой архитектуры приведен на рис. 4.33. Чтобы шина не блокировала работу коммутатора, ее производительность должна равняться по крайней мере сумме производительности всех портов коммутатора. Для модульных коммутаторов некоторые сочетания модулей с низкоскоростными портами могут приводить к неблокирующей работе, а установка модулей с высокоскоростными портами может приводить к тому, что блокирующим элементом станет, например, общая шина.

Кадр должен передаваться по шине небольшими частями, по несколько байт, чтобы передача кадров между несколькими портами происходила в псевдопараллельном режиме, не внося задержек в передачу кадра в целом. Размер такой ячейки данных определяется производителем коммутатора. Некоторые производители, например, LANNET или Centillion, выбрали в качестве порции данных, переносимых за одну операцию по шине, ячейку АТМ с ее полем данных в 48 байт. Такой подход облегчает трансляцию протоколов локальных сетей в протокол АТМ, если коммутатор поддерживает эти технологии.

Входной блок процессора помещает в ячейку, переносимую по шине, тэг, в котором указывает номер порта назначения. Каждый выходной блок процессора порта содержит фильтр тэгов, который выбирает тэги, предназначенные данному порту.

Шина, так же, как и коммутационная матрица, не может осуществлять промежуточную буферизацию, но так как данные кадра разбиваются на небольшие ячейки, то задержек с начальным ожиданием доступности выходного порта в такой схеме нет— здесь работает принцип коммутации пакетов, а не каналов.



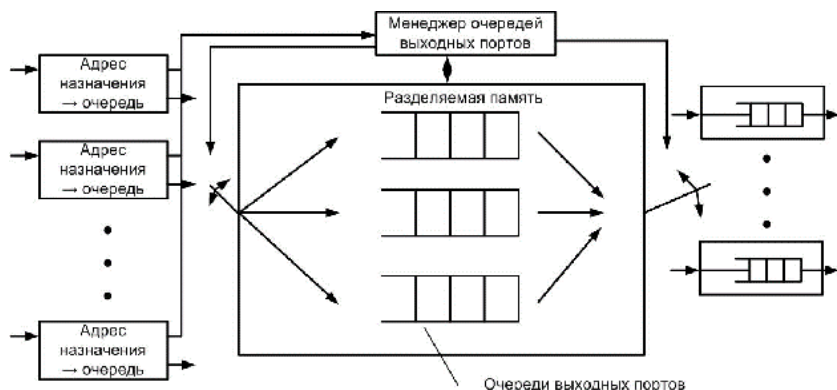
**Рис.3.** Архитектура коммутатора с общей шиной

### Коммутаторы с разделяемой памятью

Третья базовая архитектура взаимодействия портов — двухвходовая разделяемая память. Пример такой архитектуры приведен на рис. 4.34.

Входные блоки процессоров портов соединяются с переключаемым входом разделяемой памяти, а выходные блоки этих же процессоров соединяются с переключаемым выходом этой памяти. Переключением входа и выхода разделяемой памяти управляет менеджер очередей выходных портов. В разделяемой памяти менеджер организует несколько очередей данных, по одной для каждого выходного порта. Входные блоки процессоров передают менеджеру портов запросы на запись данных в очередь того порта, который соответствует адресу назначения пакета. Менеджер по очереди подключает вход памяти к одному из входных блоков процессоров и тот переписывает часть данных кадра в очередь определенного выходного порта. По мере заполнения очередей менеджер производит также поочередное подключение выхода разделяемой памяти к выходным блокам

процессоров портов, и данные из очереди переписываются в выходной буфер процессора.



**Рис.4.** Архитектура разделяемой памяти

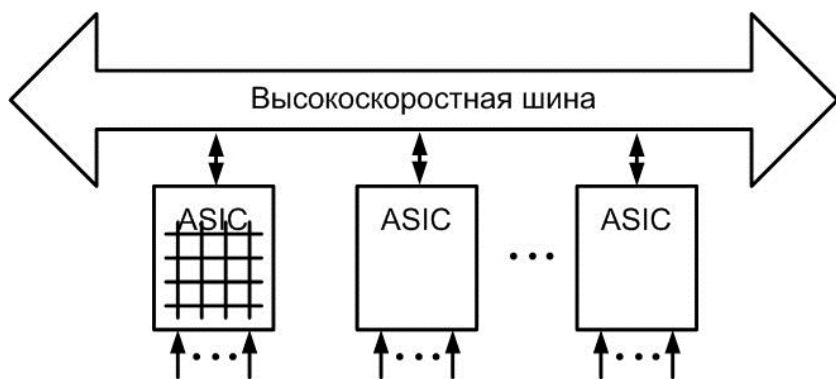
Память должна быть достаточно быстродействующей для поддержания скорости переписи данных между  $N$  портами коммутатора. Применение общей буферной памяти, гибко распределяемой менеджером между отдельными портами, снижает требования к размеру буферной памяти процессора порта.

### **Комбинированные коммутаторы**

У каждой из описанных архитектур есть свои преимущества и недостатки, поэтому часто в сложных коммутаторах эти архитектуры применяются в комбинации друг с другом. Пример такого комбинирования приведен на рис. 5.

Коммутатор состоит из модулей с фиксированным количеством портов (2-12), выполненных на основе специализированной БИС, реализующей архитектуру коммутационной матрицы. Если порты, между которыми нужно передать кадр данных, принадлежат одному модулю, то передача кадра осуществляется процессорами модуля на основе имеющейся в модуле коммутационной матрицы. Если же порты принадлежат разным модулям, то процессоры общаются по общей

шине. При такой архитектуре передача кадров внутри модуля будет происходить быстрее, чем при межмодульной передаче, так как коммутационная матрица — наиболее быстрый, хотя и наименее масштабируемый способ взаимодействия портов. Скорость внутренней шины коммутаторов может достигать нескольких Гбит/с, а у наиболее мощных моделей — до 20-30 Гбит/с.



**Рис.5.** Комбинирование архитектур коммутационной матрицы и общей шины

### **Конструктивное исполнение коммутаторов**

В конструктивном отношении коммутаторы делятся на следующие типы:

- автономные коммутаторы с фиксированным количеством портов;
- модульные коммутаторы на основе шасси;
- коммутаторы с фиксированным количеством портов, собираемые в стек.

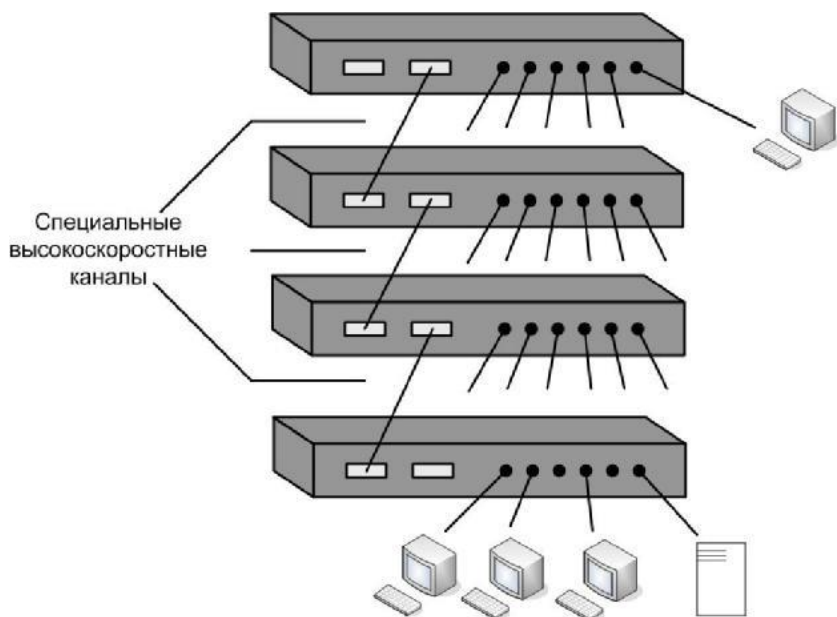
Первый тип коммутаторов обычно предназначен для организации небольших рабочих групп. Модульные коммутаторы на основе шасси чаще всего предназначены для применения на магистрали сети. Поэтому они выполняются на основе какой-либо комбинированной схемы, в которой взаимодействие модулей организуется по

быстродействующей шине или же на основе быстрой разделяемой памяти большого объема. Модули такого коммутатора выполняются на основе технологии «hot swap», то есть допускают замену на ходу, без выключения коммутатора, так как центральное коммуникационное устройство сети не должно иметь перерывов в работе. Шасси обычно снабжается резервированными источниками питания и резервированными вентиляторами в тех же целях.

С технической точки зрения определенный интерес представляют стековые коммутаторы. Эти устройства представляют собой коммутаторы, которые могут работать автономно, так как выполнены в отдельном корпусе, но имеют специальные интерфейсы, которые позволяют их объединять в общую систему, работающую как единый коммутатор. Говорят, что в этом случае отдельные коммутаторы образуют стек.

Обычно такой специальный интерфейс представляет собой высокоскоростную шину, которая позволяет объединить отдельные корпуса подобно модулям в коммутаторе на основе шасси. Так как расстояния между корпусами больше, чем между модулями на шасси, скорость обмена по шине обычно ниже, чем у модульных коммутаторов: 200-400 Мбит/с. Не очень высокие скорости обмена между коммутаторами стека обусловлены также тем, что стековые коммутаторы обычно занимают промежуточное положение между коммутаторами с фиксированным количеством портов и коммутаторами на основе шасси.

Стековые коммутаторы применяются для создания сетей рабочих групп и отделов, поэтому сверхвысокие скорости шин обмена им не очень нужны и не соответствуют их ценовому диапазону.

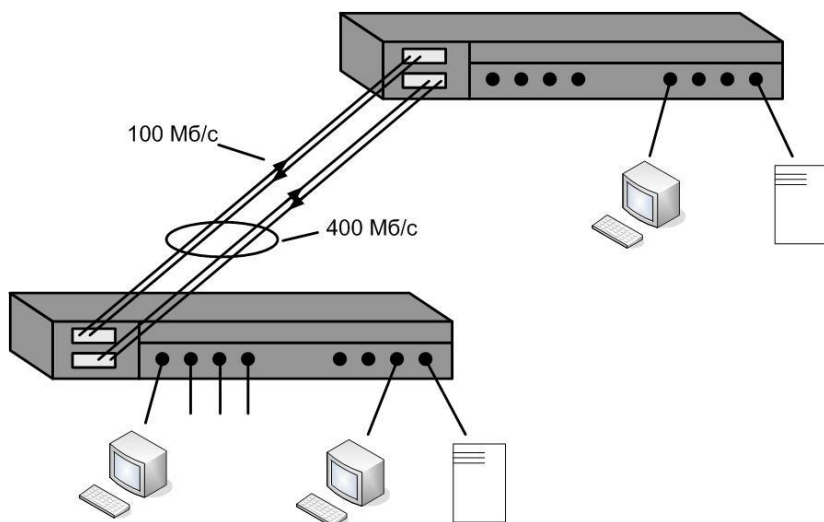


**Рис. 6.** Стек коммутаторов, объединяемых по высокоскоростным каналам

Компания Cisco предложила другой подход к организации стека. Ее коммутатор Catalyst 3000 также имеет специальный скоростной интерфейс 280 Мбит/с для организации стека, но с его помощью коммутаторы соединяются не друг с другом, а с отдельным устройством, содержащим коммутационную матрицу 8x8, организующую более высокопроизводительный обмен между любыми парами коммутаторов.

Существуют коммутаторы, которые позволяют объединить два коммутатора полнодуплексным каналом более чем по одной паре портов. Например, коммутаторы модели 28115 компании Nortel Networks имеют по два порта Fast Ethernet, с помощью которых можно соединять коммутаторы, образуя полнодуплексный канал с производительностью 400 Мбит/с (рис. 7).





**Рис. 7.** Транковое полнодуплексное соединение коммутаторов 28115 компании NortelNetworks

Такие соединения называются транковыми и являются частной разработкой каждой компании, выпускающей коммуникационное оборудование, так как нарушают не только логику доступа к разделяемым средам, но и топологию соединения мостов, запрещающую петлевидные контуры (а такой контур всегда образуется при соединении коммутаторов более чем одной парой портов). При соединении коммутаторов разных производителей транк работать не будет, так как каждый производитель добавляет к логике изучения адресов сети коммутатором по транковой связи что-то свое, чтобы добиться от него правильной работы.

### **Характеристики, влияющие на производительность коммутаторов**

Производительность коммутатора — то свойство, которое сетевые интеграторы и администраторы ждут от этого устройства в первую очередь.

Основными показателями коммутатора, характеризующими его производительность, являются:

- [скорость фильтрации кадров;](#)
- [скорость продвижения кадров;](#)
- [пропускная способность;](#)
- [задержка передачи кадра.](#)

Кроме того, существует несколько характеристик коммутатора, которые в наибольшей степени влияют на указанные характеристики производительности. К ним относятся:

- [тип коммутации — «на лету» или с полной буферизацией;](#)
- [размер буфера \(буферов\) кадров;](#)
- производительность внутренней шины;
- производительность процессора или процессоров;
- [размер внутренней адресной таблицы.](#)

### **Скорость фильтрации и скорость продвижения**

Скорость фильтрации и продвижения кадров — это две основные характеристики производительности коммутатора. Эти характеристики являются интегральными показателями, они не зависят от того, каким образом технически реализован коммутатор.

Скорость фильтрации (filtering) определяет скорость, с которой коммутатор выполняет следующие этапы обработки кадров:

- прием кадра в свой буфер;
- просмотр адресной таблицы с целью нахождения порта для адреса назначения кадра;
- уничтожение кадра, так как его порт назначения и порт источника принадлежат одному логическому сегменту.

Скорость фильтрации практически у всех коммутаторов является неблокирующей — коммутатор успевает отбрасывать кадры в темпе их поступления.

Скорость продвижения (forwarding) определяет скорость, с которой коммутатор выполняет следующие этапы обработки кадров:

- прием кадра в свой буфер;
- просмотр адресной таблицы с целью нахождения порта для адреса назначения кадра;

- передача кадра в сеть через найденный по адресной таблице порт назначения.

Как скорость фильтрации, так и скорость продвижения измеряются обычно в кадрах в секунду. Если скорости указаны для какого-либо определенного протокола, например Token Ring или FDDI, то они также даны для кадров минимальной длины этого протокола (например, кадров длины 29 байт для протокола FDDI). Применение в качестве основного показателя скорости работы коммутатора кадров минимальной длины объясняется тем, что такие кадры всегда создают для коммутатора наиболее тяжелый режим работы по сравнению с кадрами другого формата при равной пропускной способности переносимых пользовательских данных.

Пропускная способность коммутатора измеряется количеством пользовательских данных (в мегабитах в секунду), переданных в единицу времени через его порты. Так как коммутатор работает на канальном уровне, для него пользовательскими данными являются те данные, которые переносятся в поле данных кадров протоколов канального уровня — Ethernet, Token Ring, FDDI и т.п. Максимальное значение пропускной способности коммутатора всегда достигается на кадрах максимальной длины, так как при этом доля накладных расходов на служебную информацию кадра гораздо ниже, чем для кадров минимальной длины, а время выполнения коммутатором операций по обработке кадра, приходящееся на один байт пользовательской информации, существенно меньше. Поэтому коммутатор может быть блокирующим для кадров минимальной длины, но при этом иметь очень хорошие показатели пропускной способности.

Задержка передачи кадра измеряется как время, прошедшее с момента прихода первого байта кадра на входной порт коммутатора до момента появления этого байта на его выходном порту. Задержка складывается из времени, затрачиваемого на буферизацию байт кадра, а также времени, затрачиваемого на обработку кадра коммутатором, —

просмотра адресной таблицы, принятия решения о фильтрации или продвижении и получения доступа к среде выходного порта.

Величина вносимой коммутатором задержки зависит от режима его работы. Если коммутация осуществляется «на лету», то задержки обычно невелики и составляют от 5 до 40 мкс, а при полной буферизации кадров— от 50 до 200 мкс (для кадров минимальной длины).

Коммутатор — это многопортовое устройство, поэтому для него принято все приведенные выше характеристики (кроме задержки передачи кадра) давать в двух вариантах. Первый вариант - суммарная производительность коммутатора при одновременной передаче трафика по всем его портам, второй вариант — производительность, приведенная в расчете на один порт. Обычно производители коммутаторов указывают общую максимальную пропускную способность устройства.

### **Коммутация «на лету» или с буферизацией**

На производительности коммутатора сказывается способ передачи пакетов — «на лету» или с буферизацией. Коммутаторы, передающие пакеты «на лету», вносят меньшие задержки передачи кадров на каждом промежуточном коммутаторе, поэтому общее уменьшение задержки доставки данных может быть значительным, что важно для мультимедийного трафика.

Средняя величина задержки коммутаторов, работающих «на лету», при высокой нагрузке объясняется тем, что в этом случае выходной порт часто бывает занят приемом другого пакета, поэтому вновь поступивший пакет для данного порта все равно приходится буферизовать. Коммутатор, работающий «на лету», может выполнять проверку некорректности передаваемых кадров, но не может изъять плохой кадр из сети, так как часть его байт (и, как правило, большая часть) уже переданы в сеть.

Так как каждый способ имеет свои достоинства и недостатки, в тех моделях коммутаторов, которым нужно транслировать протоколы,

иногда применяется механизм адаптивной смены режима работы коммутатора. Основным режим такого коммутатора — коммутация «на лету», но коммутатор постоянно контролирует трафик и при превышении интенсивности появления плохих кадров некоторого порога переходит на режим полной буферизации. Затем коммутатор может вернуться к коммутации «на лету».

Таблица 1. Возможности коммутаторов при коммутации «на лету» и с полной буферизацией

<b>Функция</b>	<b>На лету</b>	<b>С буферизацией</b>
Защита от плохих кадров	Нет	Да
Поддержка разнородных сетей(Ethernet, Token Ring, FDDI, ATM)	Нет	Да
Задержка передачи пакетов	Низкая(5-40 мкс) при низкой нагрузке, средняя при высокой нагрузке	Средняя при любой нагрузке
Поддержка резервных связей	Нет	Да
Функция анализа трафика	Нет	Да

### **Размер адресной таблицы**

Максимальная емкость адресной таблицы определяет предельное количество MAC-адресов, с которыми может одновременно оперировать коммутатор. Так как коммутаторы чаще всего используют для выполнения операций каждого порта выделенный процессорный блок со своей памятью для хранения экземпляра адресной таблицы, то размер адресной таблицы для коммутаторов обычно приводится в

расчете на один порт. Экземпляры адресной таблицы разных процессорных модулей не обязательно содержат одну и ту же адресную информацию — скорее всего, повторяющихся адресов будет не так много, если только распределение трафика каждого порта между остальными портами не полностью равновероятно. Каждый порт хранит только те наборы адресов, с которыми он работал в последнее время.

Значение максимального числа MAC-адресов, которое может запомнить процессор порта, зависит от области применения коммутатора. Коммутаторы рабочих групп обычно поддерживают всего несколько адресов на порт, так как они предназначены для образования микросегментов. Коммутаторы отделов должны поддерживать несколько сотен адресов, а коммутаторы магистралей сетей — до нескольких тысяч, обычно 4000-8000 адресов.

Недостаточная емкость адресной таблицы может служить причиной замедления работы коммутатора и засорения сети избыточным трафиком. Если адресная таблица процессора порта полностью заполнена, а он встречает новый адрес источника в поступившем пакете, процессор должен вытеснить из таблицы какой-либо старый адрес и поместить на его место новый. Эта операция сама по себе отнимет у процессора часть времени, но главные потери производительности будут наблюдаться при поступлении кадра с адресом назначения, который пришлось удалить из адресной таблицы. Так как адрес назначения кадра неизвестен, то коммутатор должен передать этот кадр на все остальные порты. Эта операция будет создавать лишнюю работу для многих процессоров портов, кроме того, копии этого кадра будут попадать и на те сегменты сети, где они совсем не обязательны.

Некоторые производители коммутаторов решают эту проблему за счет изменения алгоритма обработки кадров с неизвестным адресом назначения. Один из портов коммутатора конфигурируется как магистральный порт, на который по умолчанию передаются все кадры с неизвестным адресом. В маршрутизаторах такой прием применяется

давно, позволяя сократить размеры адресных таблиц в сетях, организованных по иерархическому принципу.

Передача кадра на магистральный порт производится в расчете на то, что этот порт подключен к вышестоящему коммутатору при иерархическом соединении коммутаторов в крупной сети, который имеет достаточную емкость адресной таблицы и знает, куда нужно передать любой кадр.

### **Объем буфера кадров**

Внутренняя буферная память коммутатора нужна для временного хранения кадров данных в тех случаях, когда их невозможно немедленно передать на выходной порт. Буфер предназначен для сглаживания кратковременных пульсаций трафика. Ведь даже если трафик хорошо сбалансирован и производительность процессоров портов, а также других обрабатывающих элементов коммутатора достаточна для передачи средних значений трафика, это не гарантирует, что их производительности хватит при пиковых значениях нагрузок. Например, трафик может в течение нескольких десятков миллисекунд поступать одновременно на все входы коммутатора, не давая ему возможности передавать принимаемые кадры на выходные порты.

Для предотвращения потерь кадров при кратковременном многократном превышении среднего значения интенсивности трафика (а для локальных сетей часто встречаются значения коэффициента пульсации трафика в диапазоне 50-100) единственным средством служит буфер большого объема. Как и в случае адресных таблиц, каждый процессорный модуль порта обычно имеет свою буферную память для хранения кадров. Чем больше объем этой памяти, тем менее вероятны потери кадров при перегрузках, хотя при несбалансированности средних значений трафика буфер все равно рано или поздно переполнится.

Обычно коммутаторы, предназначенные для работы в ответственных частях сети, имеют буферную память в несколько

десятков или сотен килобайт на порт. Дополнительным средством защиты может служить общий для всех портов буфер в модуле управления коммутатором. Такой буфер обычно имеет объем в несколько мегабайт.

### **Дополнительные функции коммутаторов**

Так как коммутатор представляет собой сложное вычислительное устройство, имеющее несколько процессорных модулей, то естественно нагрузить его помимо выполнения основной функции передачи кадров с порта на порт по алгоритму моста и некоторыми дополнительными функциями, полезными при построении надежных и гибких сетей. Ниже описываются наиболее распространенные дополнительные функции коммутаторов, которые поддерживаются большинством производителей коммуникационного оборудования.

### **Поддержка алгоритма Spanning Tree**

Алгоритм покрывающего дерева — Spanning Tree Algorithm (STA) позволяет коммутаторам автоматически определять древовидную конфигурацию связей в сети при произвольном соединении портов между собой. Как уже отмечалось, для нормальной работы коммутатора требуется отсутствие замкнутых маршрутов в сети. Эти маршруты могут создаваться администратором специально для образования резервных связей или же возникать случайным образом, что вполне возможно, если сеть имеет многочисленные связи, а кабельная система плохо структурирована или документирована.

Поддерживающие алгоритм STA коммутаторы автоматически создают активную древовидную конфигурацию связей (то есть связную конфигурацию без петель) на множестве всех связей сети. Такая конфигурация называется покрывающим деревом — Spanning Tree (иногда ее называют основным деревом), и ее название дало имя всему алгоритму. Алгоритм Spanning Tree описан в стандарте IEEE 802. ID, том же стандарте, который определяет принципы работы прозрачных мостов.



Коммутаторы находят покрывающее дерево адаптивно, с помощью обмена служебными пакетами. Реализация в коммутаторе алгоритма STA очень важна для работы в больших сетях — если коммутатор не поддерживает этот алгоритм, то администратор должен самостоятельно определить, какие порты нужно перевести в заблокированное состояние, чтобы исключить петли. К тому же при отказе какого-либо кабеля, порта или коммутатора администратор должен, во-первых, обнаружить факт отказа, а во-вторых, ликвидировать последствия отказа, переведя резервную связь в рабочий режим путем активизации некоторых портов. При поддержке коммутаторами сети протокола Spanning Tree отказы обнаруживаются автоматически, за счет постоянного тестирования связности сети служебными пакетами. После обнаружения потери связности протокол строит новое покрывающее дерево, если это возможно, и сеть автоматически восстанавливает работоспособность.

Алгоритм Spanning Tree определяет активную конфигурацию сети за три этапа.

- Сначала в сети определяется корневой коммутатор (root switch), от которого строится дерево. Корневой коммутатор может быть выбран автоматически или назначен администратором. При автоматическом выборе корневым становится коммутатор с меньшим значением MAC-адреса его блока управления.
- Затем, на втором этапе, для каждого коммутатора определяется корневой порт (root port)— это порт, который имеет по сети кратчайшее расстояние до корневого коммутатора (точнее, до любого из портов корневого коммутатора).
- И наконец, на третьем этапе для каждого сегмента сети выбирается так называемый назначенный порт (designated port) — это порт, который имеет кратчайшее расстояние от данного сегмента до корневого коммутатора. После определения корневых и назначенных портов каждый коммутатор блокирует остальные порты, которые не попали в эти два класса портов.

Понятие расстояния играет важную роль в построении покрывающего дерева. Именно поэтому критерию выбирается единственный порт, соединяющий каждый коммутатор с корневым коммутатором, и единственный порт, соединяющий каждый сегмент сети с корневым коммутатором.

Расстояние до корня определяется как суммарное условное время на передачу одного бита данных от порта данного коммутатора до порта корневого коммутатора. При этом считается, что время внутренних передач данных (с порта на порт) коммутатором пренебрежимо мало, а учитывается только время на передачу данных по сегментам сети, соединяющим коммутаторы. Условное время сегмента рассчитывается как время, затрачиваемое на передачу одного бита информации в 10 наносекундных единицах между непосредственно связанными по сегменту сети портами. Так, для сегмента Ethernet это время равно 10 условным единицам, а для сегмента Token Ring 16 Мбит/с — 6,25. (Алгоритм STA не связан с каким-либо определенным стандартом канального уровня, он может применяться к коммутаторам, соединяющим сети различных технологий.)

Для автоматического определения начальной активной конфигурации дерева все коммутаторы сети после их инициализации начинают периодически обмениваться специальными пакетами, называемыми протокольными блоками данных — BPDU (Bridge Protocol Data Unit), что отражает факт первоначальной разработки алгоритма STA для мостов.

Пакеты BPDU помещаются в поле данных кадров канального уровня, например, кадров Ethernet или FDDI. Желательно, чтобы все коммутаторы поддерживали общий групповой адрес, с помощью которого кадры, содержащие пакеты BPDU, могли бы одновременно передаваться всем коммутаторам сети. Иначе пакеты BPDU рассылаются широковещательно.

У пакета BPDU уведомления о реконфигурации отсутствуют все поля, кроме двух первых. Идентификаторы коммутаторов состоят из 8 байт, причем младшие 6 являются MAC-адресом блока управления

коммутатора. Старшие 2 байта в исходном состоянии заполнены нулями, но администратор может изменить значение этих байтов, тем самым назначив определенный коммутатор корневым.

После инициализации каждый коммутатор сначала считает себя корневым. Поэтому он начинает через интервал hello генерировать через все свои порты сообщения BPDU конфигурационного типа. В них он указывает свой идентификатор в качестве идентификатора корневого коммутатора (и в качестве идентификатора данного коммутатора также), расстояние до корня устанавливается в 0, а в качестве идентификатора порта указывается идентификатор того порта, через который передается BPDU. Как только коммутатор получает BPDU, в котором имеется идентификатор корневого коммутатора, со значением, меньшим его собственного, он перестает генерировать свои собственные кадры BPDU, а начинает ретранслировать только кадры нового претендента на звание корневого коммутатора.

При ретрансляции кадров каждый коммутатор наращивает расстояние до корня, указанное в пришедшем BPDU, на условное время сегмента, по которому принят данный кадр. Тем самым в кадре BPDU, по мере прохождения через коммутаторы, накапливается расстояние до корневого коммутатора.

Ретранслируя кадры, каждый коммутатор для каждого своего порта запоминает минимальное расстояние до корня, встретившееся во всех принятых этим портом кадрах BPDU. При завершении процедуры установления конфигурации покрывающего дерева (по времени) каждый коммутатор находит свой корневой порт— это порт, для которого минимальное расстояние до корня оказалось меньше, чем у других портов.

Кроме корневого порта коммутаторы распределенным образом выбирают для каждого сегмента сети назначенный порт. Для этого они исключают из рассмотрения свой корневой порт (для сегмента, к которому он подключен, всегда существует другой коммутатор, который ближе расположен к корню), а для всех своих оставшихся

портов сравнивают принятые по ним минимальные расстояния до корня с расстоянием до корня своего корневого порта. Если у какого-либо своего порта принятые им расстояния до корня больше, чем расстояние маршрута, пролегающего через свой корневой порт, то это значит, что для сегмента, к которому подключен данный порт, кратчайшее расстояние к корневому коммутатору ведет именно через данный порт. Коммутатор делает все свои порты, у которых такое условие выполняется, назначенными.

Если в процессе выбора корневого порта или назначенного порта несколько портов оказываются равными по критерию кратчайшего расстояния до корневого коммутатора, то выбирается порт с наименьшим идентификатором.

В процессе нормальной работы корневой коммутатор продолжает генерировать служебные кадры BPDU, а остальные коммутаторы продолжают их принимать своими корневыми портами и ретранслировать назначенными. Если по истечении тайм-аута корневой порт любого коммутатора сети не получает служебный кадр BPDU, то он инициализирует новую процедуру построения покрывающего дерева, оповещая об этом другие коммутаторы BPDU уведомления о реконфигурации. Получив такой кадр, все коммутаторы начинают снова генерировать BPDU конфигурационного типа, в результате чего устанавливается новая активная конфигурация.

## **Трансляция протоколов канального уровня**

Коммутаторы могут выполнять трансляцию одного протокола канального уровня в другой, например Ethernet в FDDI, Fast Ethernet в Token Ring и т. п. При этом они работают по тем же алгоритмам, что и транслирующие мосты, то есть в соответствии со спецификациями IEEE 802.1H и RFC 1042, определяющими правила преобразования полей кадров разных протоколов.

Трансляцию протоколов локальных сетей облегчает тот факт, что наиболее сложную работу, которую при объединении гетерогенных сетей часто выполняют маршрутизаторы и шлюзы, а именно работу по

трансляции адресной информации, в данном случае выполнять не нужно. Все конечные узлы локальных сетей имеют уникальные адреса одного и того же формата независимо от поддерживаемого протокола. Поэтому адрес сетевого адаптера Ethernet понятен сетевому адаптеру FDDI, и они могут использовать эти адреса в полях своих кадров не задумываясь о том, что узел, с которым они взаимодействуют, принадлежит сети, работающей по другой технологии.

Поэтому при согласовании протоколов локальных сетей коммутаторы не строят таблиц соответствия адресов узлов, а переносят адреса назначения и источника из кадра одного протокола в кадр другого.

### **Возможности коммутаторов по фильтрации трафика**

Многие коммутаторы позволяют администраторам задавать дополнительные условия фильтрации кадров наряду со стандартными условиями их фильтрации в соответствии с информацией адресной таблицы.

Наиболее простыми являются пользовательские фильтры на основе MAC-адресов станций. Так как MAC-адреса — это информация, с которой работает коммутатор, то он позволяет задавать фильтры в удобной для администратора форме, возможно, проставляя некоторые условия в дополнительном поле адресной таблицы. При этом пользователю, работающему на компьютере с данным MAC-адресом, полностью запрещается доступ к ресурсам другого сегмента сети.

Часто администратору требуется задать более тонкие условия фильтрации, например запретить некоторому пользователю печатать свои документы на определенном сервере печати NetWare чужого сегмента, а остальные ресурсы этого сегмента сделать доступными. Для реализации такого фильтра нужно запретить передачу кадров с определенным MAC-адресом, в которых вложены пакеты IPX, в поле «номер сокета» которых будет указано значение, соответствующее службе печати NetWare. Коммутаторы не анализируют протоколы верхних уровней, такие как IPX, поэтому администратору приходится

для задания условий такой фильтрации вручную определять поле, по значению которого нужно осуществлять фильтрацию, в виде пары «смещение - размер» относительно начала поля данных кадра канального уровня, а затем еще указать в шестнадцатеричном формате значение этого поля для службы печати.

Обычно условия фильтрации записываются в виде булевых выражений, формируемых с помощью логических операторов AND и OR.

Наложение дополнительных условий фильтрации может снизить производительность коммутатора, так как вычисление булевых выражений требует проведения дополнительных вычислений процессорами портов.

### **Приоритетная обработка кадров**

Построение сетей на основе коммутаторов позволяет использовать приоритезацию трафика, причем делать это независимо от технологии сети. Эта новая возможность (по сравнению с сетями, построенными целиком на концентраторах) является следствием того, что коммутаторы буферизуют кадры перед их отправкой на другой порт. Коммутатор обычно ведет для каждого входного и выходного порта не одну, а несколько очередей, причем каждая очередь имеет свой приоритет обработки. При этом коммутатор может быть сконфигурирован, например, так, чтобы передавать один низкоприоритетный пакет на каждые 10 высокоприоритетных пакетов. Поддержка приоритетной обработки может особенно пригодиться для приложений, предъявляющих различные требования к допустимым задержкам кадров и к пропускной способности сети для потока кадров.

Основным вопросом при приоритетной обработке кадров коммутаторами является вопрос назначения кадру приоритета. Так как не все протоколы канального уровня поддерживают поле приоритета кадра, например у кадров Ethernet оно отсутствует, то коммутатор должен использовать какой-либо дополнительный механизм для связывания кадра с его приоритетом. Наиболее распространенный

способ — приписывание приоритета портам коммутатора. При этом способе коммутатор помещает кадр в очередь кадров соответствующего приоритета в зависимости от того, через какой порт поступил кадр в коммутатор. Способ несложный, но недостаточно гибкий— если к порту коммутатора подключен не отдельный узел, а сегмент, то все узлы сегмента получают одинаковый приоритет.

Более гибким является назначение приоритетов кадрам в соответствии с достаточно новым стандартом IEEE 802.1p. Этот стандарт разрабатывался совместно со стандартом 802.1Q, который рассматривается в следующем разделе, посвященном виртуальным локальным сетям. В обоих стандартах предусмотрен общий дополнительный заголовок для кадров Ethernet, состоящий из двух байт. В этом дополнительном заголовке, который вставляется перед полем данных кадра, 3 бита используются для указания приоритета кадра. Существует протокол, по которому конечный узел может запросить у коммутатора один из восьми уровней приоритета кадра. Если сетевой адаптер не поддерживает стандарт 802.1p, то коммутатор может назначать приоритеты кадрам на основе порта поступления кадра. Такие помеченные кадры будут обслуживаться в соответствии с их приоритетом всеми коммутаторами сети, а не только тем коммутатором, который непосредственно принял кадр от конечного узла.

### **Сочетание коммутаторов и концентраторов**

Сочетание коммутаторов и концентраторов При построении небольших сетей, составляющих нижний уровень иерархии корпоративной сети, вопрос о применении того или иного коммуникационного устройства сводится к вопросу о выборе между концентратором или коммутатором.

При ответе на этот вопрос нужно принимать во внимание несколько факторов. Безусловно, немаловажное значение имеет стоимость в пересчете за порт, которую нужно заплатить при выборе устройства. Из технических соображений в первую очередь нужно принять во

внимание существующее распределение трафика между узлами сети. Кроме того, нужно учитывать перспективы развития сети: будут ли в скором времени применяться мультимедийные приложения, будет ли модернизироваться компьютерная база. Если да, то нужно уже сегодня обеспечить резервы по пропускной способности применяемого коммуникационного оборудования. Использование технологии intranet также ведет к увеличению объемов трафика, циркулирующего в сети, и это также необходимо учитывать при выборе устройства.

При выборе типа устройства — концентратор или коммутатор — нужно еще определить и тип протокола, который будут поддерживать его порты (или протоколов, если идет речь о коммутаторе так как каждый порт может поддерживать отдельный протокол).

Если коммутатор имеет все порты с одинаковой пропускной способностью, например 10 Мбит/с, в этом случае пропускная способность порта в 10 Мбит/с будет распределяться между всеми компьютерами сети. Возможности коммутатора по повышению общей пропускной способности сети оказываются для такой конфигурации невостребованными. Несмотря на микросегментацию сети, ее пропускная способность ограничивается пропускной способностью протокола одного порта, как и в случае применения концентратора с портами 10 Мбит/с. Небольшой выигрыш при использовании коммутатора будет достигаться лишь за счет уменьшения количества коллизий — вместо коллизий кадры будут просто попадать в очередь к передатчику порта коммутатора, к которому подключен сервер.

Чтобы коммутатор работал в сетях с выделенным сервером более эффективно, производители коммутаторов выпускают модели с одним высокоскоростным портом на 100 Мбит/с для подключения сервера и несколькими низкоскоростными портами на 10 Мбит/с для подключения рабочих станций. В этом случае между рабочими станциями распределяется уже 100 Мбит/с, что позволяет обслуживать в неблокирующем режиме 10-30 станций в зависимости от интенсивности создаваемого ими трафика.



Однако с таким коммутатором может конкурировать концентратор, поддерживающий протокол с пропускной способностью 100 Мбит/с, например Fast Ethernet. Его стоимость в пересчете за порт будет несколько ниже стоимости за порт коммутатора с одним высокоскоростным портом, а производительность сети примерно та же.

### **Стянутая в точку магистраль на коммутаторе**

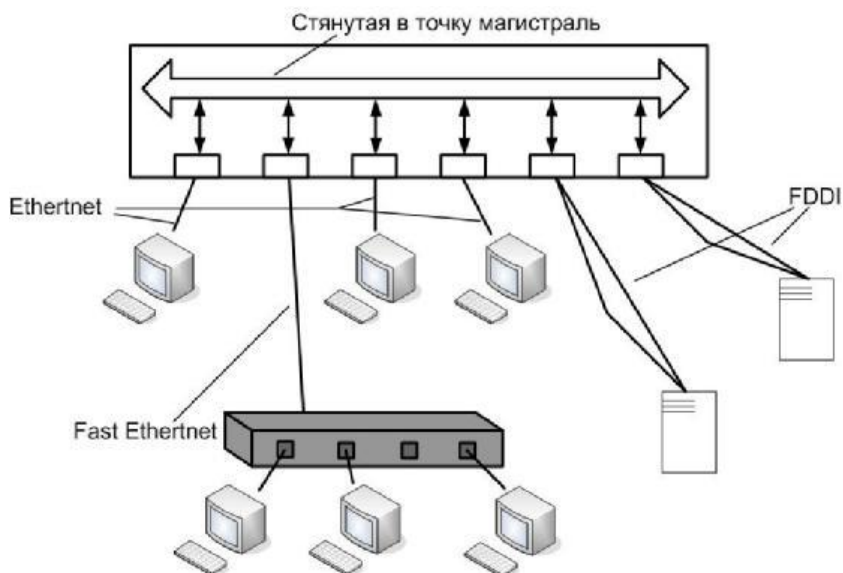
При всем разнообразии структурных схем сетей, построенных на коммутаторах, все они используют две базовые структуры— стянутую в точку магистраль и распределенную магистраль. На основе этих базовых структур затем строятся разнообразные структуры конкретных сетей.

Стянутая в точку магистраль (collapsed backbone)— это структура, при которой объединение узлов, сегментов или сетей происходит на внутренней магистрали коммутатора.

Преимуществом такой структуры является высокая производительность магистрали. Так как для коммутатора производительность внутренней шины или схемы общей памяти, объединяющей модули портов, в несколько гигабит в секунду не является редкостью, то магистраль сети может быть весьма быстродействующей, причем ее скорость не зависит от применяемых в сети протоколов и может быть повышена с помощью замены одной модели коммутатора на другую.

Положительной чертой такой схемы является не только высокая скорость магистрали, но и ее протокольная независимость. На внутренней магистрали коммутатора в независимом формате одновременно могут передаваться данные различных протоколов, например Ethernet, FDDI и Fast Ethernet, как это изображено на рис. 4.44. Подключение нового узла с новым протоколом часто требует не замены коммутатора, а просто добавления соответствующего интерфейсного модуля, поддерживающего этот протокол.

Если к каждому порту коммутатора в такой схеме подключен только один узел, то такая схема будет соответствовать микросегментированной сети.



**Рис. 9.** Структура сети со стянутой в точку магистралью

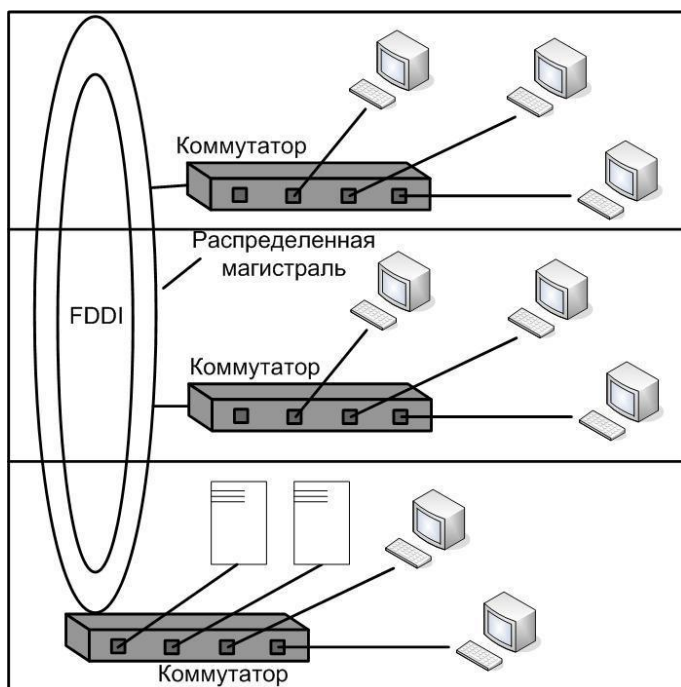
### **Распределенная магистраль на коммутаторах**

Распределенная магистраль — это разделяемый сегмент сети, поддерживающий определенный протокол, к которому присоединяются коммутаторы сетей рабочих групп и отделов. На примере распределенная магистраль построена на основе двойного кольца FDDI, к которому подключены коммутаторы этажей. Коммутаторы этажей имеют большое количество портов Ethernet, трафик которых транслируется в трафик протокола FDDI, когда он передается по магистрали с этажа на этаж.

Распределенная магистраль упрощает связи между этажами, сокращает стоимость кабельной системы и преодолевает ограничения на расстояния.

Однако скорость магистрали в этом случае будет существенно ниже скорости магистрали на внутренней шине коммутатора. Причем скорость эта фиксированная и в настоящее время чаще всего не превышает 100 Мбит/с. Поэтому распределенная магистраль может применяться только при невысокой интенсивности трафика между этажами или зданиями. Широкое распространение в недалеком будущем технологии Gigabit Ethernet может снять это ограничение, что очень положительно скажется на структуре крупных сетей.

Пример на рис. 10 демонстрирует сочетание двух базовых структур, так как на каждом этаже сеть построена с использованием магистрали на внутренней шине коммутатора.



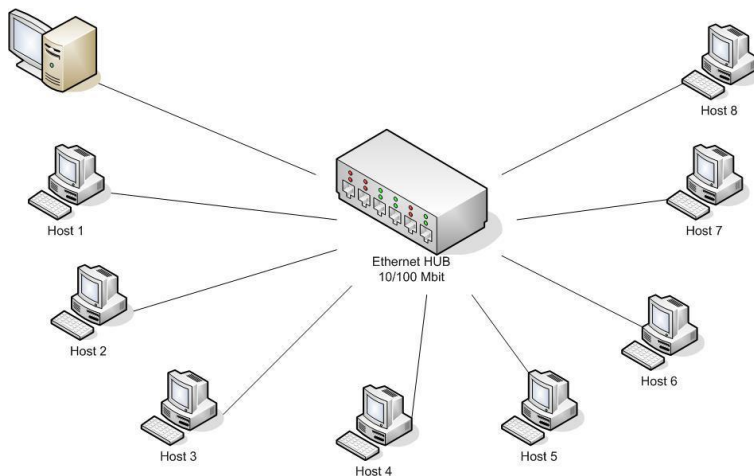
**Рис.10.** Структура сети с распределенной магистралью

## ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

Предварительно согласовав с преподавателем спроектировать новую топологию сети отдела, обеспечивающую большую производительность. Для этого необходимо:

1. Изучить текущую непродуктивную топологию сети отдела.

Схема сети:



Данная конфигурация сети не обеспечивала требуемой производительности.

В результате проведенного мониторинга сети администратором было установлено, что рабочие станции №1 и №8 интенсивно работают с приложениями сервера и используют его ресурсы в качестве файл сервера. Остальным рабочим станциям сеть была необходима для распечатки своих документов и обмена между собой небольшими объемами информации.

На коммутаторе этажа (Switch 10/100) имеется 4 резервных порта.

2. Спроектировать новую топологию сети отдела, обеспечивающую требуемую производительность, без замены имеющегося оборудования (предоставить схему в письменном виде).
3. Собрать спроектированную модель на имеющемся оборудовании.
4. Практически доказать соответствие заданным требованиям.
5. Ответить на контрольные вопросы и оформить отчет.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Приведите архитектуру первых коммутаторов.
2. Приведите классификацию схем построения узла обмена данными.
3. Перечислите недостатки и достоинства коммутаторов на основе коммутационной матрицы.
4. Опишите функционал коммутатора на основе коммутационной матрицы.
5. Опишите функционал коммутатора с общей шиной.
6. Опишите функционал коммутатора с разделяемой памятью.
7. Приведите архитектуру комбинированных коммутаторов.
8. Приведите классификацию коммутаторов по конструктивному исполнению.
9. Перечислите особенности модульных коммутаторов.
10. Перечислите особенности стековых коммутаторов.
11. Дайте определение транковому соединению.
12. Перечислите основные характеристики производительности коммутаторов.
13. Дайте определение скорости продвижения кадров.
14. Перечислите особенности коммутации "на лету" и с буферизацией.
15. Раскройте значение термина адресная таблица.
16. Изложите концепцию покрывающего дерева.
17. Перечислите преимущества алгоритма STA.
18. Опишите назначение приоритизации трафика.
19. Перечислите преимущества стянутой в точку магистрали.
20. Что такое распределенная магистраль на коммутаторах?

## **ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

На выполнение лабораторной работы отводится 2 занятия (4 академических часа: 3 часа на выполнение и сдачу лабораторной работы и 1 час на подготовку отчета).

Отчет на защиту предоставляется в печатном виде.

Структура отчета (на отдельном листе(-ах)): титульный лист, формулировка задания, ответы на контрольные вопросы, описание процесса выполнения лабораторной работы, выводы.

## **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Смелянский, Р.Л. Компьютерные сети. В 2 т. Т. 1. Системы передачи данных: учебник для вузов /Р.Л. Смелянский М.: Изд. центр «Академия». 2011. -304 с.
2. Смелянский, Р.Л. Компьютерные сети. В 2 т. Т. 2. Сети ЭВМ: учебник для вузов /Р.Л. Смелянский М.: Изд. центр «Академия». 2011 -240 с.

## **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

3. Технологии коммутации и маршрутизации в локальных компьютерных сетях: учеб пособие для вузов / А.В. Пролетарский, Е.В. Смирнова [и др.]. под ред. А.В. Пролетарского.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана 2013. -389 с.ил.
4. Дейтел, Х.М. Как программировать на С++/ Х.М. Дейтел, Дж. Дейтел: пер. с англ. – М.: Бином-Пресс, 2011. -800 с.:тл

### **Электронные ресурсы:**

5. Научная электронная библиотека <http://eLIBRARY.RU>
6. Электронно-библиотечная система <http://e.lanbook.com>
7. Компьютерные сети и технологии <http://www.xnets.ru>