

## 9. Протоколы

*Сеть* – это соединение *различного оборудования*, а значит, проблема совместимости его компонентов является одной из наиболее острых. Международная организация по стандартизации OSI разработала стандартную *7-уровневую модель*, в соответствии с которой *сеть представляется как распределенная информационно-вычислительная среда*, реализуемая большим числом разнообразных *аппаратных и программных средств*. При организации их взаимодействия используется универсальный прием – *декомпозиция*: разбиение сложной задачи на несколько более простых задач-модулей (рис. 9.1), четкое определение *функций каждого модуля* и *интерфейсов* между ними, что позволяет модифицировать отдельные модули без изменения остальной части системы.

Модули *нижнего уровня* решают задачи, связанные с надежной *передачей электрического сигнала* между двумя соседними узлами, на *более высоком уровне* – организуют *транспортировку данных* в пределах всей сети и т.д. При этом должны быть приняты соглашения для всех уровней.

*Формализованные правила*, определяющие *последовательность* и *формат* сообщений, которыми обмениваются сетевые компоненты, находящиеся *на одном уровне*, но *в разных узлах*, называются *протоколом*. Модули, реализующие протоколы *соседних уровней* и находящиеся *в одном узле*, также взаимодействуют друг с другом в соответствии с четко определенными *правилами* и с помощью стандартизованных *форматов* сообщений. *Эти правила* называются *интерфейсом*.

Средства каждого уровня должны обрабатывать свой собственный *протокол*, а также *интерфейсы* с соседними уровнями. *На практике, установление соединения означает вход в протокол*.

Протоколы могут быть реализованы как программно, так и аппаратно. На нижних уровнях они часто реализуются *комбинацией программных и аппаратных средств*, а на верхних – как правило, чисто *программными* средствами – компонентами сетевой ОС.

1. **Физический** (*physical*) – *управление физическим каналом*: пересылка битов в соответствии с принятым способом доступа к СПД; учет механического/электрического соединения с СПД. *Реализуется аппаратно* сетевыми устройствами (в частности, сетевым адаптером).

2. **Канальный** (*link*) – *управление информационным каналом*: передача данных по физическому адресу сети и доступ к СПД; добавление информации для проверки ошибок и подготовки данных для их передачи по СПД; “упаковка” пакетов в кадры (*frame*), приемлемые для данной СПД. *Реализуются* сетевыми адаптерами и их драйверами.

3. **Сетевой** (*network*) – *управление сетью*: логическим каналом передачи данных в сети (адресация и маршрутизация данных, коммутация каналов, сообщений, пакетов и т.д.); образование единой транспортной системы из нескольких сетей; формирование своих IP-пакетов. *Реализуется* программными модулями ОС, а также программными и аппаратными средствами маршрутизаторов.

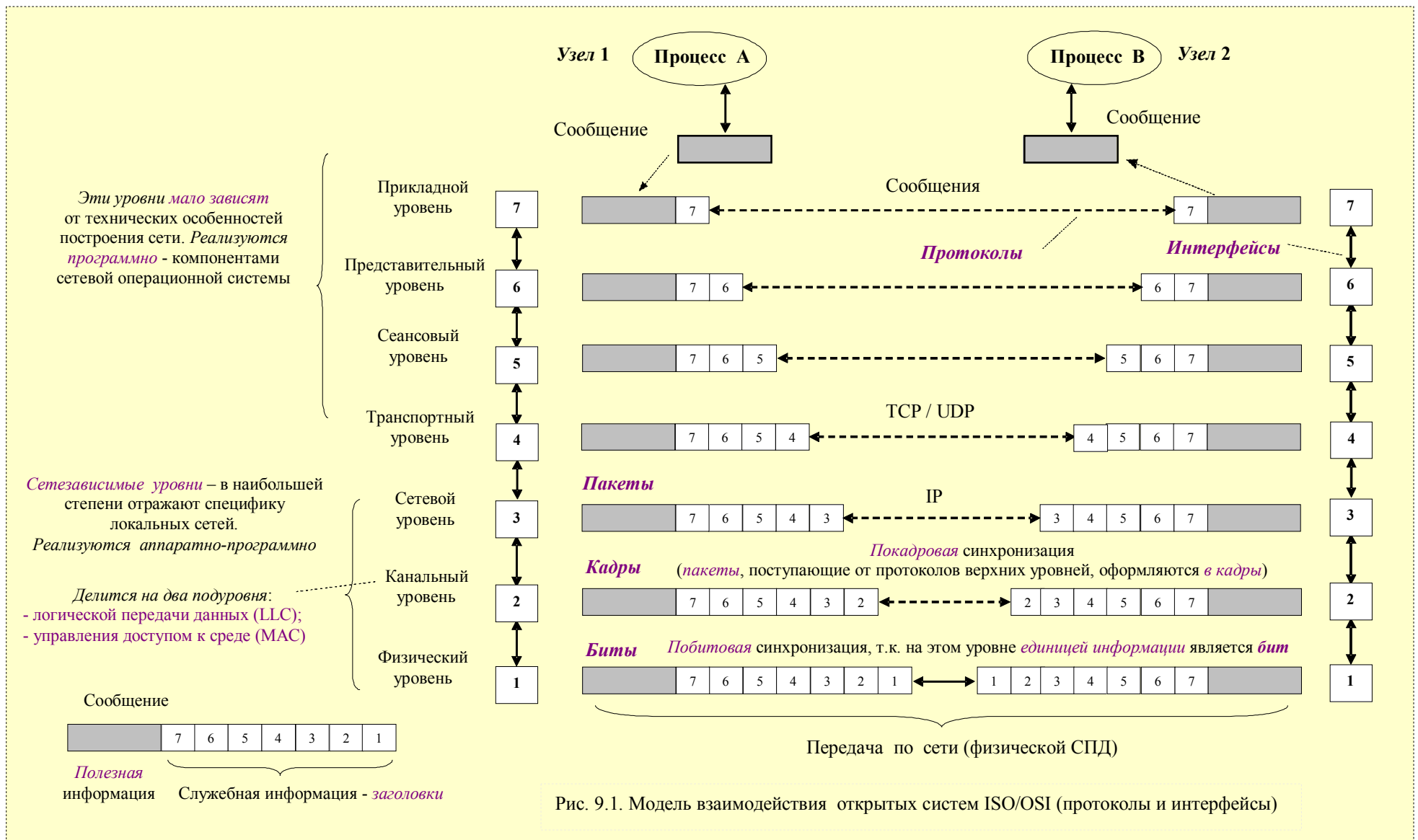
4. **Транспортный** (*transport*) – *управление информационным потоком (трафиком)*: преобразование сообщений в пакеты, добавление информации для обработки ошибок; прозрачная передача пакетов данных по сети; организация постоянных или временных логических каналов между процессами *i* и *j* сети; обеспечение прикладных уровней (5-7) надежной службой передачи сообщений, не зависящей от используемой сети.

5. **Сеансовый** (*session*) – *управление сеансом*: организация, синхронизация, добавление информации о времени отправки сообщения; управление диалогом между устройствами сети (аутентификация и проверка полномочий).

6. **Представления данных** (*presentation*) – *управление представлением данных*: преобразование сообщений, создаваемых прикладным уровнем, в некоторый общепринятый формат, в том числе защита и сжатие данных. *На приемном узле* решаются обратные задачи, обеспечивая прикладному уровню “читаемость” сообщений.

7. **Прикладной** (*application*) – *управление прикладными процессами*: это самый “близкий” к пользователю уровень. Он *обеспечивает*: формирование запроса к узлам сети или прием аналогичных запросов; программам пользователя - средства доступа к сетевым ресурсам. Содержит несколько прикладных протоколов и служит интерфейсом между пользователем и различными обеспечиваемыми службами. Единица информации, которой оперирует данный уровень - *сообщение*.

Все, что находится выше 7-го уровня модели, это задачи, решаемые в прикладных программах.

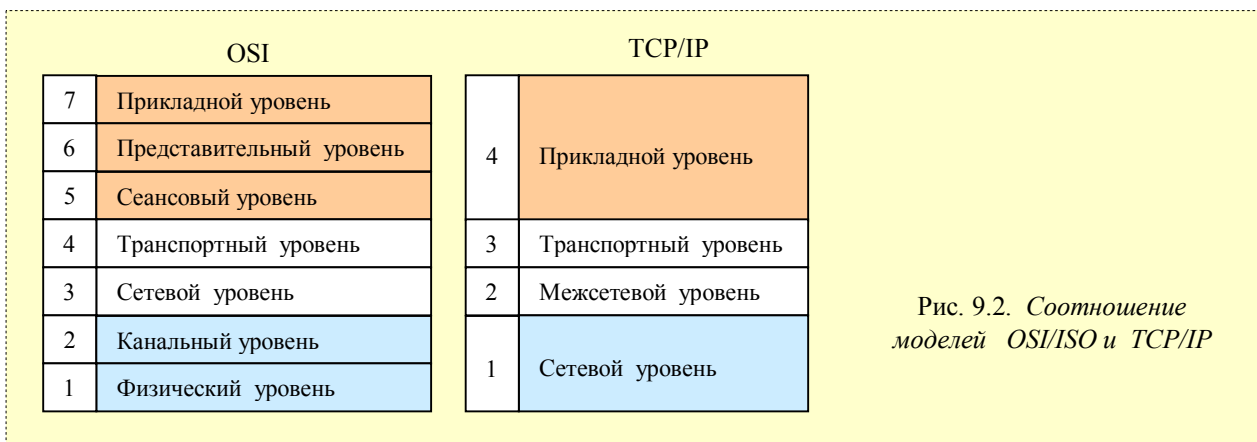


**Пример:** Протокол *физического* уровня спецификации 10Base-T Ethernet. Он определяет: *кабель* – неэкранированная ВП категории 3 с волновым сопротивлением 100 Ом; *разъем* - RJ-45; максимальную *длину сегмента* – 100 м; *скорость* передачи данных – 10 Мбит/с; *манчестерский код*; характеристики среды и сигналов (скорость передачи данных, уровни напряжения и др.).

Иерархически организованный *набор протоколов*, работающих в сети одновременно, и являющийся *достаточным* для организации взаимодействия узлов в сети, называют *стеком протоколов* (например TCP/IP, IPX/SPX).

*Стек протоколов TCP/IP* - от названия двух основных протоколов, входящих в него, TCP (*Transmission Control Protocol*) и IP (*Internet Protocol*) - это набор протоколов, посредством которых соединены как различные сети, входящие в Интернет, так и компьютеры, входящие в многочисленные локальные и корпоративные сети. Он обеспечивает общий программный интерфейс к разнообразному аппаратному обеспечению от различных фирм.

Т.к. стек TCP/IP был разработан до появления модели OSI, то соответствие его уровней уровням модели OSI достаточно условно (*рис. 9.2*).



Для передачи по сети *сообщение* разбивается на *пакеты* - части сообщения с добавленным заголовком пакета, или дейтаграммы. Название блока данных, передаваемого по сети, зависит от того, на каком *уровне стека* протоколов он находится.

Блок данных, с которым имеет дело *сетевой* интерфейс, называют *кадром* (*frame*). Если блок данных находится на *межсетевом* уровне, его называют *пакетом*. На транспортном уровне блок данных называют *UDP-дейта-граммой*, *сегментом TCP* или *пакетом TCP*. На уровне *сетевых приложений* говорят о *прикладных сообщениях*.

Для сетевого уровня полезной информацией является уже *пакет*, или *дейтаграмма* транспортного уровня. К ним добавляется заголовок сетевого уровня. Полученный блок данных называется *IP-пакетом*. Полезной нагрузкой для канального уровня является уже IP-пакет. Здесь перед передачей по каналу к нему добавляются собственный заголовок и еще *концевик*. Получившийся блок называют *кадром*. Он и передается по сети. Описанная операция добавления служебной информации при обработке по уровням протокола называется *инкапсуляцией*.

Рассмотрим более подробно распределение протоколов по уровням модели TCP/IP

*Физический уровень* - описывает СПД, физические характеристики и принцип передачи. *Канальный уровень* - описывает, каким образом передаются пакеты данных через физический уровень, включая *кодирование* (т.е. специальные последовательности бит, определяющих начало и конец пакета данных). *Канальный уровень* - иногда разделяют на 2 подуровня - LLC и MAC. *Сетевой уровень* - изначально разработан для передачи данных из одной (под)сети в другую. Пакеты сетевого протокола IP могут содержать код, указывающий, какой именно протокол следующего уровня нужно использовать, чтобы извлечь данные из пакета. Это число — уникальный *IP-номер протокола*.

Протоколы *транспортного уровня* могут решать проблему негарантированной доставки сообщений, а также гарантировать правильную последовательность прихода данных. В стеке TCP/IP транспортные протоколы определяют, для какого именно приложения предназначены эти данные.

*Протоколы автоматической маршрутизации*, логически представленные на этом уровне (по-скольку работают поверх IP), на самом деле являются частью протоколов сетевого уровня.

TCP - «гарантированный» транспортный механизм с предварительным установлением соединения, предоставляющий приложению надёжный поток данных, дающий уверенность в безошибочности получаемых данных, перезапрашивающий данные в случае потери и устраняющий дублирование данных. TCP гарантирует, что полученные данные были отправлены точно в такой же последовательности. В этом его главное отличие от UDP.

UDP - протокол передачи дейтаграмм без установления соединения. Также его называют протоколом «ненадёжной» передачи, в смысле невозможности удостовериться в доставке сообщения адресату, а также возможного перемешивания пакетов. В приложениях, требующих гарантированной передачи данных, используется протокол TCP.

*Одним из фундаментальных понятий IP-протокола является IP-адрес*; им идентифицируются все узлы сети. IP-адрес представляет собой 32-битовый идентификатор, который удобно представлять в так называемой *точечной* нотации (Dot-notation/*дот-нотация*) – в виде последовательности разделенных точками четырех десятичных (или 16-ричных с префиксом 0x) чисел, представляющих значения отдельных байтов (*табл. 9.1*). Для этого 32-битовый IP-адрес разбивается на 4 байта. Т.е. максимальное десятичное число в обозначении IP-адреса (в группе) не более 255.

IP-адрес	Ethernet-адрес
192.168.2.1	8-0-39-0-2f-c3
....	....
192.168.2.4	8-0-10-99-ac-54

Каждый адрес является совокупностью двух идентификаторов: *сети* – NetID (*номер сети*) и *узла* – HostID (*номер узла*). Все возможные адреса разделены на 5 классов (*рис. 9.3*). Сети классов А, В и С равноправны и отличаются лишь допустимым количеством узлов в них:

- адреса класса **А** используются в крупных сетях – до  $2^{24}-2=16777214$  узлов;
- адреса класса **В** в среднемасштабных сетях – до  $2^{16}-2=65\ 534$  узлов;
- адреса класса **С** в небольших сетях – до  $2^8-2=254$  узлов;
- адреса класса **Д** используются для организации многопунктового режима;
- адреса класса **Е** зарезервированы и не используются.

*К специальным адресам относятся:*

- IP-адрес с нулевым номером узла – для обозначения сети в целом;
- IP-адрес с номером узла в виде *единичных битов* (десятичное число 255) – является широковещательным (broadcast) адресом;
- IP-адрес с первым байтом адреса 127 обозначает так называемый закольцованный интерфейс – фиктивную сеть, не имеющую реального аппаратного интерфейса и состоящую только из локального узла (127.0.0.1); по этому адресу узел может обратиться сам к себе без передачи по сети.

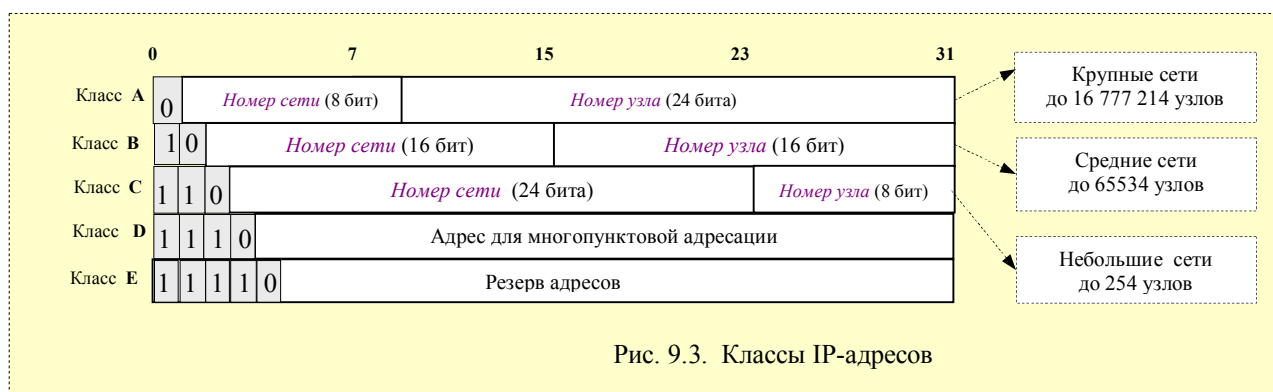


Рис. 9.3. Классы IP-адресов

Для обеспечения гибкости при создании и администрировании сетей различного размера было введено понятие «*подсеть*», позволяющее применять один и тот же IP-адрес классов А, В или С

для разных подсетей. Это обеспечивается специальной *битовой маской (netmask)*, ассоциированной с IP-адресом и определяющей распределение битов IP-адреса между номером подсети и номером узла. Маска сети *накладывается* на IP-адрес *по правилу*: если значение бита маски равно 1, то адресация узлов запрещена, а если 0 - разрешена. В сетевой маске биты маскируются только подряд от старшего к младшему, т.е. слева направо.

С учетом этого правила для сетей класса А, В и С получим следующие дот-нотации сетевых масок: класс А – 255.0.0.0; класс В – 255.255.0.0; класс С – 255. 255. 255.0.

**Пример.** Пусть в пределах сети с IP-адресом 211.135.14.0 класса С необходимо организовать работу 4 подсетей. Для этого надо зарезервировать 2 (старших) бита из номера узла сети (последний байт адреса), как показано на *рис. 9.4*. Тогда маска сети имеет вид: 255.255.255.192.

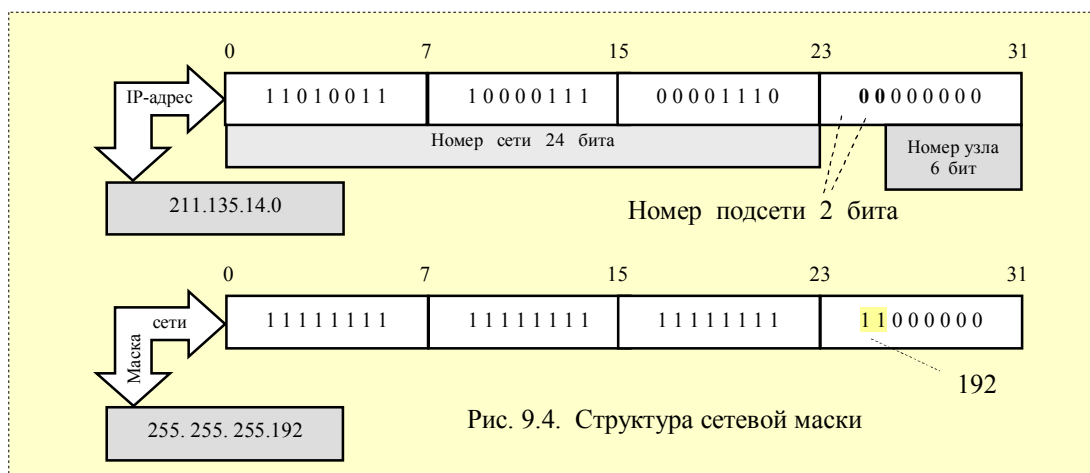


Рис. 9.4. Структура сетевой маски

После преобразования IP-адреса для идентификации узла используются оставшиеся 6 бит, поэтому каждая из подсетей может включать до 62 узлов. Необходимо учесть, что при каждом делении сети на 2 подсети 2 адреса теряются [нулевой – адрес сети, единичный – широковещательный]; в рассматриваемом примере при делении на 4 подсети теряется 8 адресов - по 2 на каждую подсеть. Номера подсетей при таком делении определяются комбинацией единиц и нулей в 24 и 25 разрядах IP-адреса: для первой подсети - **00**, второй - **01**, третьей – **10** и четвертой – **11**.

*Диапазоны адресов узлов определяются следующими номерами:*

- подсеть № 1 (00) 211.135.14.1 - 211.135.14.62;
- подсеть № 2 (01) 211.135.14.65 - 211.135.14.126;
- подсеть № 3 (10) 211.135.14.129 - 211.135.14.190;
- подсеть № 4 (11) 211.135.14.193 - 211.135.14.254.

В битовой форме записи маски совмещается адрес *подсети* и ее *маска*. Так, для приведенного ранее примера IP-адреса 211.135.14.0 класса С в битовой форме сетевая маска записывается в виде 211.135.14/24, где 24 указывает на число маскированных битов IP-адреса. При каждом последующем разделении сети пополам маска увеличивается на 1 (см. табл. 9.2).

Количество адресов подсети	Дот-нотация	Шестнадцатеричное число	Битовая нотация
256	255.255.255.0	0xffffffff00	x.x.x/24
128	255.255.255.128	0xffffffff80	x.x.x/25
64	255.255.255.192	0xffffffc0	x.x.x/26
32	255.255.255.224	0xffffffe0	x.x.x/27
16	255.255.255.240	0xfffffff0	x.x.x/28
8	255.255.255.248	0xfffffff8	x.x.x/29
4	255.255.255.252	0xfffffff0	x.x.x/30

### ***Локальные промышленные сети (ЛПС)***

В ЛПС применяются десятки коммуникационных технологий и протоколов. Они позволяют создавать распределенные системы (рис. 9.5), объединяющие различные ДЧ, ПРК, ИМ и другие устройства, подключение которых к сетям обычно осуществляется с помощью сложных специализиро-

ванных протоколов: *Profibus*, *FIP*, *ControlNet*, *Interbus-S*, *DeviceNet*, *P-NET*, *WorldFIP*, *LongWork* или *Modbus Plus*. Протоколы разработаны с учетом особенностей производства и технических систем, обеспечивают надежные соединения и высокую точность управления. Кроме надежности функционирования все более важными требованиями в системах АСУ ТП становятся: функциональные возможности; простота инсталляции и обслуживания; адаптируемость к специфическим условиям; соответствие общепринятым стандартам.

Несмотря на попытки стандартизации, производители продолжают развивать разные технологии, шинные интерфейсы, архитектуры контроллеров, ОСРВ, протоколы, языки программирования и продвигать собственные сетевые решения для связи различного оборудования.

#### *Проблемы стандартизации технологий промышленной связи*

Развитие МП-технологии способствовало переходу к архитектуре РСУ: функции автоматизации все чаще стали реализовываться вне блока ЦП — в ДЧ, агрегатах и ИМ. Простые сенсоры и ДЧ стали превращаться в коммуникационные устройства. «*Интеллектуализация*» периферийного технологического оборудования и появление цифровых интерфейсов породили потребность в новых видах коммуникаций — создание локальных сетей, функционирующих на нижнем уровне автоматизации.

**ЛПС отличаются:** - детерминированностью поведения, - поддержкой функций РВ, - повышенной надежностью передачи данных в среде с высоким уровнем электромагнитных помех, - наличием защищенных от воздействия среды разъемов.

В числе *типичных требований*, предъявляемых к таким сетям:

- простая СПД (например, двухпроводная линия),
- различная топология (шинная, звездообразная, древовидная),
- разные расстояния (до нескольких километров) и скорости передачи данных,
- электропитание через шину,
- защита передаваемой информации,
- простота использования.

ЛПС различаются также способами доступа к среде передачи данных и особенностями управления (централизованное или децентрализованное). Включение в сеть промышленных устройств - процесс во многом более сложный, чем объединение в сети ПК и телекоммуникационных устройств. Наличие многочисленных несовместимых реализаций в области ЛПС затрудняет интеграцию в единую систему компонентов разных производителей и препятствует широкому распространению интеллектуальных устройств. Все это требует стандартизации, чтобы уйти от закрытых решений. Всюду необходим некий физический способ объединения промышленных или бортовых компьютеров, ПРК, ДЧ, ИМ, оборудования ВВ, согласующих и других устройств.

Сети *на уровне устройств, физически связанных с объектом управления*, имеют отличительные признаки и их называют *локальными промышленными сетями* (ЛПС). В переводной литературе - “*полевая шина*” (*Fieldbus*). **ЛПС можно охарактеризовать следующим образом. Это цифровая, двунаправленная, многоточечная, последовательная коммуникационная сеть, обеспечивающая:**

- передачу данных;
- настройку, ввод в эксплуатацию и диагностику оборудования системы управления;
- питание датчиков (ДЧ) и исполнительных механизмов (ИМ);
- передачу данных между ДЧ и ИМ минуя программируемый контроллер (ПРК);
- связи между ДЧ, ИМ, ПРК, и верхними уровнями системы;
- связи между ПРК и системами человеко-машинного интерфейса и др.

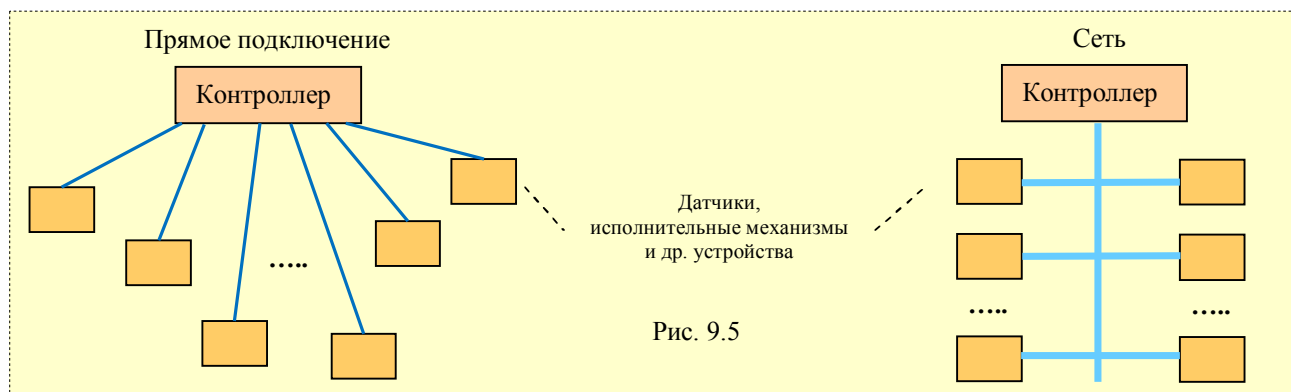
Промышленные сети - непосредственно связаны с производственной зоной, где работают ПРК, датчики и исполнительные механизмы. Задача промышленной сети состоит в организации физической и логической связи датчиков с системным интеллектом, роль которого выполняют ПРК или промышленные компьютеры таким образом, чтобы информация с этого уровня была доступна верхним уровням системы.

В сравнении с подключением оборудования к ПРК *отдельными проводами* (рис. 9.5) ЛПС имеет следующие *достоинства*:

- в несколько раз снижается расход на кабель и его прокладку;
- увеличивается допустимое расстояние до подключаемых ДЧ и ИМ;

- упрощается управление сетью ДЧ и ИМ;
- упрощается модификация системы при изменении типа ДЧ, протокола взаимодействия, добавлении устройств ввода-вывода;
- позволяют дистанционно настраивать ДЧ и проводить их диагностику.

*Однако*, при обрыве кабеля теряется возможность получать данные и управлять не одним, а несколькими устройствами, а для повышения надёжности приходится резервировать каналы связи.



К ЛПС относятся, например:

- **Modbus/RS-485** - простая, дешёвая и широко распространённая ЛПС;
- **Промышленный Ethernet** - вариант Ethernet для применения в промышленности;
- **HART (Highway Addressable Remote Transducer)** - для аналоговых датчиков и их настройки;
- **AS-Interface (Actuator Sensor Interface)** - для дискретных датчиков;
- **CAN (Control Area Network)** - для транспорта и машиностроения;
- **Profibus (PROcess Ffield Bus)** — Profibus DP, Profibus FMS, Profibus PA; - и другие.

Наиболее популярны: **CAN, LON, Profibus, WorldFIP, Foundation Fieldbus, ASI, HART** и соответствующие им **протоколы**.

**Основные компоненты ЛПС**: топология сети, физическая среда передачи данных (СПД), метод доступа к СПД, программное обеспечение (ПО) сети.

Интегрировать в единую систему изделия от различных производителей позволяет использование **принципов открытых систем**. **Сеть** считается **открытой**, если *имеется возможность использовать то, что уже наработано другими, или выполнять собственные разработки, в том числе и такие, которые могут использоваться другими*.

Применение **технологии ЛПС смещает интеллект на нижние иерархические уровни систем**, позволяет осуществлять решение ряда несложных задач управления и контроля не прибегая к средствам более высоких уровней. Пассивные ранее устройства теперь могут воспринимать команды, выполнять диагностику, сообщать о состояниях, ошибках, обеспечивать функции самонастройки.

**Специфическими требованиями**, которым должны удовлетворять ЛПС, являются:

- жесткая **детерминированность** (предсказуемость) поведения;
- обеспечение **реального масштаба времени**;
- использование **недорогих** СПД при **больших расстояниях** (например, витые пары);
- **повышенная надёжность** передачи данных;
- наличие специальных **высоконадёжных механических соединительных** компонентов.

Ключевые требования - **детерминированность** поведения (все возможные события в сети могут быть заранее четко определены), и **повышенная надёжность** передачи данных.

Система управления сложными объектами реализуется в общем случае на основе **иерархии ЛПС**, при этом обычно различают 2 уровня: **уровень датчиков** и **уровень управления**.

Задачи **уровня датчиков** (Sensor/actuator level) – **объединение** простых устройств: ДЧ, ИМ и др. устройств, имеющих **специальную интерфейсную микросхему**; **обеспечение высокоскоростной** передачи **коротких** сообщений. Длина сегмента сети обычно порядка 100 м, число узлов – несколько десятков, объем передаваемых данных за цикл – от одного до нескольких десятков байт. Примеры этих сетей: ASI, Interbus-S, Profibus DP, HART.

Задачи *уровня управления* (Field level) – *объединение* ПРК для сбора, обработки информации и управления объектами. Такие ЛПС могут обращаться к серверу за соответствующими ресурсами. Сеть может объединять сотни узлов и обеспечивать передачу больших объемов данных. Примеры этих сетей: Profibus FMS, Vitbus и Ethernet.

Рассмотренные сетевые уровни связываются посредством *мостов* между собой и с верхними уровнями системы. Сравнительные характеристики ЛПС на этих уровнях приведены в *табл. 9.3*.

Табл. 9.3. Сравнительные характеристики ЛПС <i>различных уровней</i>		
<i>Основные критерии</i>	<i>Уровень датчиков</i>	<i>Уровень управления</i>
<i>Расширение сети</i>	до 100 м	от 100 м до 1 км
<i>Время цикла</i>	от 1 мс до 1 с	от 10 мс до 10 с
<i>Объем передаваемых данных за цикл</i>	от 1 до 8 байт	от 8 байт до нескольких сотен байт
<i>Доступ к шине</i>	свободный	фиксированный/свободный

Современной тенденцией в организации ЛПС на нижнем уровне является обеспечение передачи *не только данных, но и питания* для конечных устройств (*AS-interface, HART, InterBus* и др.).

В целом, ЛПС – это: *физический* способ объединения устройств и *протокол* их взаимодействия.

Большинство ЛПС поддерживают *физический, канальный* и *прикладной* уровни OSI-модели. *Физический уровень* обеспечивает необходимые механические, функциональные и электрические характеристики для установления, поддержания и размыкания соединения. *Канальный уровень (передачи данных)* гарантирует передачу данных между устройствами, управляет не только сетевым доступом, но также механизмами защиты и восстановления данных в случае ошибок при передаче. *Прикладной* - обеспечивает непосредственную поддержку прикладных процессов и программ пользователя и управление взаимодействием этих программ с различными объектами сети.

Как исключение, в ЛПС LonWorks реализуются все семь уровней OSI-модели.

*Методы доступа к СПД: Централизованный* (“*ведущий/ведомый*” – “*master/slave*”), предполагающий наделение одного из узлов правами ведущего (*master*), других - ведомых (*slave*).

*Master* определяет порядок и время доступа ведомых к шине, инициирует циклы обмена данными с ведомыми узлами. Сообщения могут передаваться только одному узлу или всем узлам одновременно. В последнем случае это *широковещательный* режим, не требующий адресации каждого узла сети. При отказе ведущего узла обмен по шине *приостанавливается*. Такой метод используется, как правило, *на нижнем уровне управления* – уровне ПРК, ДЧ, ИМ.

*Децентрализованный* - предполагает наделение правами ведущего группы узлов сети. Функции ведущего в этом случае могут передаваться от одного узла к другому. Используется два варианта такого доступа: *а) метод передачи маркера* и *б) множественный доступ* с контролем несущей и обнаружением коллизий (конфликтов).

*В методе передачи маркера* право доступа к шине (*маркер*) передается циклически от одного узла сети к другому. Узел, получивший маркер, становится ведущим. Метод, как правило, используется в распределенных сетях с большой загрузкой шины.

*При множественном методе доступа* к шине право *мастера* имеет в равной степени каждый узел. Это право реализуется случайным образом (рассмотрено ранее). Такой метод доступа наиболее широко используется при относительно низкой загрузке магистрали передачи данных.

### *Стандарты интерфейсов последовательной передачи данных*

Наличие в составе современных программируемых контроллеров (ПРК) портов последовательного ввода/вывода (в частности, RS-232, RS-422, RS-485 или же токовая петля 20 мА) позволяет решать широкий круг задач, в том числе:

- осуществлять связь встроенных микроконтроллерных систем с верхними уровнями систем управления (интерфейсы RS-232C и RS-485);



- осуществлять связь с внешними по отношению к микроконтроллеру (МК) периферийными *интегральными схемами*, а также с датчиками физических величин с последовательным выходом (интерфейсы  $I^2C$ ,  $SPI$ , а также нестандартные протоколы обмена);
- обеспечение интерфейса связи с локальными сетями ПРК.

Названные интерфейсы отличаются *режимом передачи* данных (*синхронный* или *асинхронный*), *форматом кадра* и *временными диаграммами сигналов* на линиях.

Число линий, по которым происходит передача, обычно равно двум ( $I^2C$ ,  $RS-232C$ ,  $RS-485$ ) или трем ( $SPI$ , некоторые нестандартные протоколы).

*Последовательные интерфейсы*  $RS-232$  и  $RS-485$  на сегодняшний день остаются одними из самых распространенных в *промышленном* оборудовании.

Среди различных типов встроенных последовательных портов сложился "де-факто" стандарт модуля *UART* (*Universal Asynchronous Receiver and Transmitter*) - *универсального асинхронного приемопередатчика*. При этом большинство модулей *UART* кроме асинхронного режима обмена, способны также реализовать режим синхронной передачи данных. Подобные модули в *асинхронном* режиме работы позволяют реализовать протокол обмена для интерфейсов  $RS-232C$ ,  $RS-422A$ ,  $RS-485$ , в *синхронном* режиме — нестандартные синхронные протоколы обмена, и в некоторых моделях -  $SPI$ .

Появились также МК со встроенными модулями контроллеров  $CAN$  и модулями *универсального последовательного интерфейса периферийных устройств* -  $USB$  (*Universal Serial Bus*).

Рассмотрим общие вопросы, связанные с применением интерфейсных модулей (на основе *UART*), компонентами которых являются *передатчик* (ПД), *приемник* (ПР), а также: *тактовый генератор* (задание тактовой частоты приемопередатчика); *управляющие регистры* (задание режимов работы и прерываний); *статусные регистры* (установка флагов по различным событиям); *буферы* (в буфер ПР попадает принятый символ, в буфер ПД - передаваемый символ); *сдвиговые регистры в ПР и ПД* (в ПД - из него в последовательный порт сдвигаются *биты* передаваемого символа (кадра); в ПР - *побитно* накапливаются принимаемые из порта биты).

*UART* - *полнодуплексный* интерфейс, то есть ПР и ПД могут работать одновременно, независимо друг от друга. По умолчанию ПД устанавливает на линии единичный (высокий) уровень. Передача начинается (*рис. 9.6,а*) посылкой бита с нулевым уровнем (*старт-бита*), затем идут биты данных младшим битом вперед (низкий уровень - "0", высокий уровень - "1"), затем необязательный бит паритета; завершается посылка передачей одного или двух битов с единичным уровнем (*стоп-битов*).

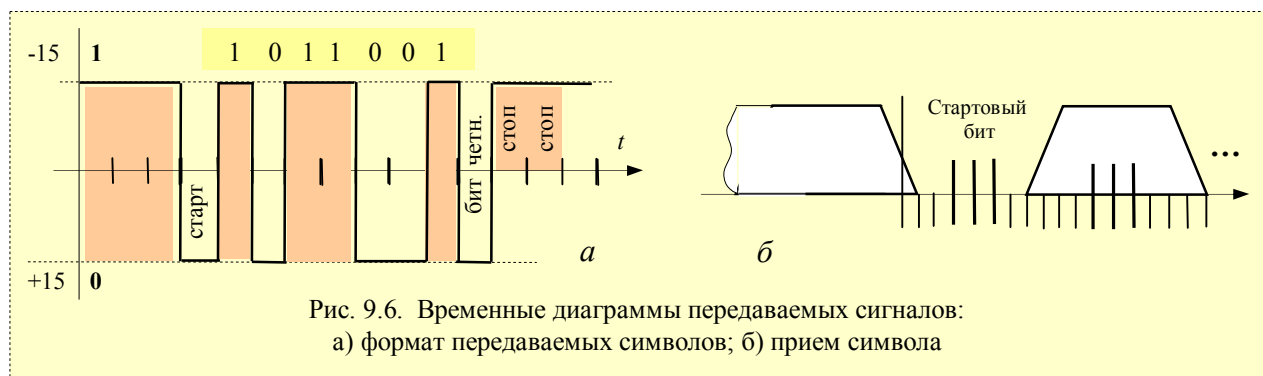


Рис. 9.6. Временные диаграммы передаваемых сигналов:  
а) формат передаваемых символов; б) прием символа

Перед началом связи между двумя устройствами необходимо настроить их приемопередатчики на одинаковую скорость и формат кадра. Скорость передачи задается делением системной частоты, типичный диапазон скоростей: 2400 .. 115200 бит/с.

ПР и ПД тактируются, как правило, с 16-кратной частотой относительно заданной скорости (*рис. 9.6,б*). Это нужно для того, чтобы ПР, определив задний фронт старт-бита, отсчитывал бы несколько тактов, а затем в следующих трех тактах осуществлял считывание (в середине старт-бита). Если большинство считанных значений - "0", то фиксируется наличие старт-бита, иначе ПР воспринимает эти отсчеты как шум и ждет появления следующего заднего фронта. После определения старт-бита, ПР точно также анализирует середины битов данных, фиксируя "0" или "1" в сдвиговом регистре.

Если уровень стоп-бита не "1", то UART определяет ошибку кадра и устанавливает соответствующий флаг в управляющем регистре.

Программные методы борьбы со сбоями – это защита от рассинхронизации и контроль достоверности

Контрольная сумма (КС) – рассчитывается в ПД и включается в кадр данных перед отправкой; ПР самостоятельно вычисляет КС сверяет ее с полученной.

Тайм-аут - максимальное время ожидания ответа от запрашиваемого устройства. При повреждении данных или выходе из строя запрашиваемого устройства ведущее устройство не «зависнет» в ожидании ответа, а по истечении определенного времени признает наличие сбоя. Тайм-аут отсчитывается с момента завершения передачи запроса. Его длительность должна с небольшим запасом превышать максимальное время ответной передачи плюс время, необходимое на обработку запроса и формирование ответа.

Квитирование - подтверждение доставки (квитанция). Это контроль получения данных ведомым, который получив данные, в случае их корректности посылает ответ, подтверждающий доставку. Если по истечении тайм-аута ведущее устройство не получает подтверждение, делается вывод о сбое в связи или в ведомом устройстве. Дальше обычные меры - *повтор послышки*.

**Рассмотрим некоторые последовательные интерфейсы более подробно.**

В частности, связь контроллеров стенда КОНТАР с компьютером (например, ПК) осуществляется на основе интерфейса RS-232 (COM-порт компьютера). При этом используется программа КОНСОЛЬ. Используется также интерфейс RS-485 для объединения ПРК семейства КОНТАР в локальную сеть.

RS-232 (Recommended Standard) - широко используемый в самых различных применениях последовательный интерфейс синхронной и асинхронной передачи данных. Он соединяет два устройства. Линия передачи первого устройства соединяется с линией приема второго и наоборот (полный дуплекс). В его основе лежит *однопроводная несогласованная линия*, по которой данные передаются *двуполярными* посылками (рис. 9.6, 9.7). Применяется при относительно медленной передаче данных (50 - 38400 бит/с); максимальная длина соединения (без повторителей) – 15 м.

Информация передается последовательно *асинхронным* способом.

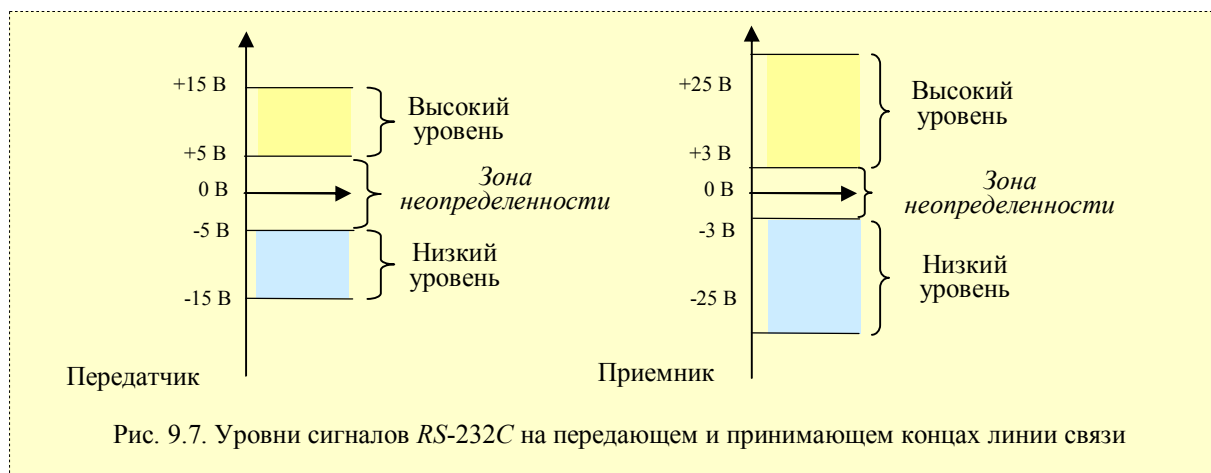


Рис. 9.7. Уровни сигналов RS-232C на передающем и принимающем концах линии связи

Интерфейсы RS-422 и RS-485. В их основе лежит принцип *дифференциальной (балансной)* передачи данных - передача одного сигнала осуществляется по двум проводам: по одному проводу (A) идет исходный сигнал, а по другому (B) - его инверсная копия. Между двумя проводами всегда есть *разность потенциалов*: при "1" она положительна, при "0" – отрицательна (рис. 9.8).

Такой способ передачи обеспечивает высокую устойчивость к синфазной (*действующей на оба провода линии одинаково*) помехе. *Аппаратная реализация* (рис. 9.9) - микросхемы приемопередатчиков с дифференциальными входами/выходами (к линии) и цифровыми портами (к портам UART контроллера). Существуют два варианта такого интерфейса: **RS-422 и RS-485**.

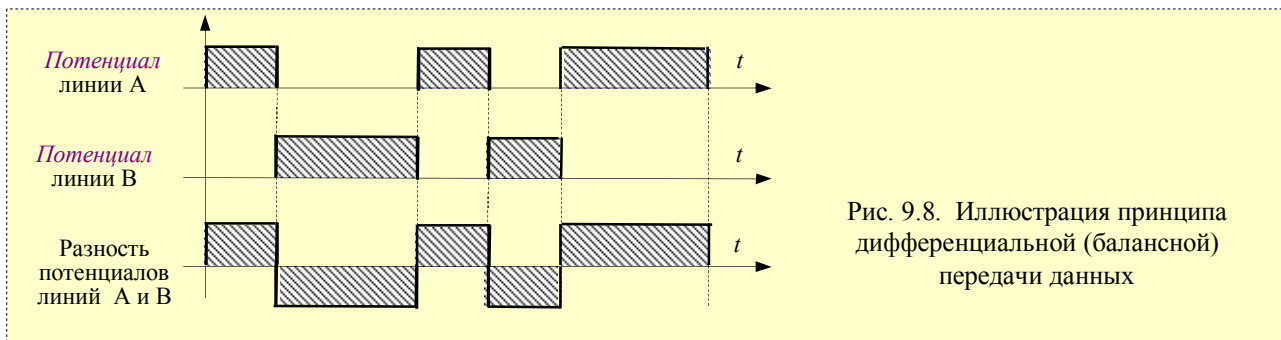


Рис. 9.8. Иллюстрация принципа дифференциальной (балансной) передачи данных

**RS-422: полнодуплексный;** прием и передача идут по двум отдельным парам проводов; на каждой паре проводов может быть только один передатчик (ПД), а приемников (ПР) - несколько; рекомендован вместо RS-232 при длине кабеля более 15 м. (рис. 9.9,а);

**RS-485: полудуплексный;** прием и передача идут по одной паре проводов с разделением по времени; в сети может быть много ПД, т.к. они могут отключаться в режиме приема (рис. 9.9,б).

Практически все компьютеры в промышленном исполнении оснащены этими интерфейсами. ПРК многих производителей, а также современные интеллектуальные датчики и элементы управления наряду с традиционным интерфейсом RS-232 также могут иметь в своем составе ту или иную реализацию интерфейсов RS-422/RS-485.

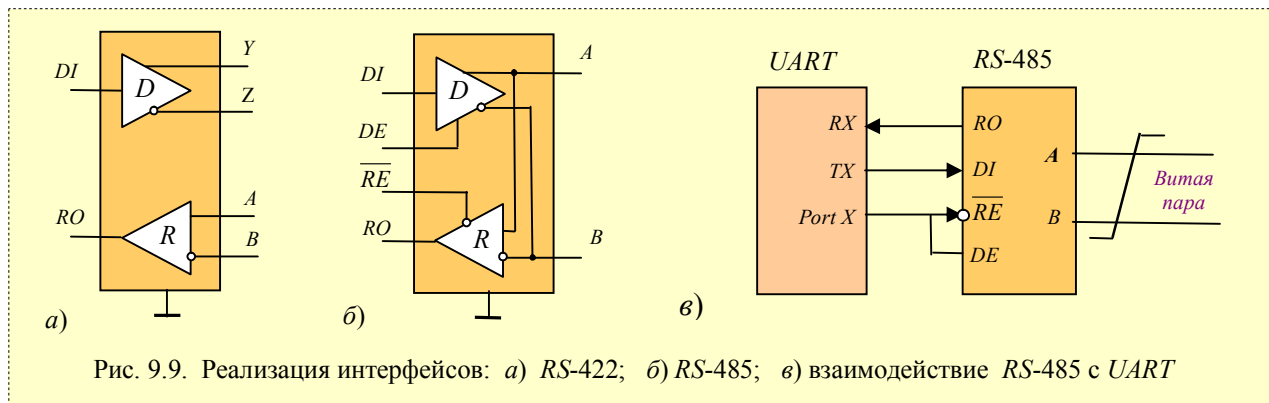


Рис. 9.9. Реализация интерфейсов: а) RS-422; б) RS-485; в) взаимодействие RS-485 с UART

На рис. 9.9 обозначено: *DI* – цифровой вход ПД; *RO* – цифровой выход ПР; *A* – прямой дифференциальный вход/выход; *B* – инверсный дифференциальный вход/выход; *Y* - прямой дифференциальный выход; *Z* - инверсный дифференциальный выход; *DE* - разрешение работы ПД; *RE* – разрешение работы ПР. **Примечание:** *D* (driver) – передатчик (ПД); *R* (receiver) – приемник (ПР).

На рис. 9.9,в приведена схема связей RS-485 с портом UART. Цифровой выход *RO* приемника (ПР) подключается к порту приемника UART (*RX*). Цифровой вход *DI* передатчика (ПД) - к порту передатчика (ПД) UART (*TX*). Так как на дифференциальной стороне ПР и ПД соединены, то во время приема нужно отключать ПД, а во время передачи - ПР. Для этого служат управляющие входы: разрешение приемника (*RE*) и разрешение передатчика (*DE*). Т.к. вход *RE* инверсный, то его можно соединить с *DE* и переключать ПР и ПД одним сигналом с UART (любой порт). При уровне "0" - работа на прием, при "1" - на передачу.

ПР, получая на дифференциальных входах (*A*, *B*) разность потенциалов ( $U_{AB}$ ) переводит ее в цифровой сигнал на выходе *RO*. Чувствительность ПР может быть разной, но не ниже гарантированных порогов, которые обычно составляют  $\pm 200$  мВ. Если  $U_{AB} > +200$  мВ, то ПР определяет "1", если  $U_{AB} < -200$  мВ, то ПР определяет "0". В противном случае распознавание сигнала не гарантируется.

Все устройства подключаются к одной витой паре одинаково: прямые выходы (*A*) к одному проводу, инверсные (*B*) - к другому.

Согласно спецификации RS-485 с учетом согласующих резисторов ПД может вести до 32 приемников. Однако есть ряд микросхем с повышенным входным сопротивлением, что позволяет подключить к линии значительно больше 32 устройств.

Максимальная скорость связи по спецификации RS-485 может достигать 10 Мбит/сек. Максимальное расстояние - 1200 м. Если необходимо организовать связь на расстоянии, большем 1200 м или подключить больше устройств, чем допускает нагрузочная способность ПД, - применяют специальные устройства - *повторители* (репитеры).

*RS-485 обладает такими свойствами, как:* возможность адресации устройств; несложность построения сети и простота эксплуатации. *Недостатки:* ограничение длины линии не более 1 км, а также значительное снижение скорости передачи данных с увеличением длины линии.

#### *Электрические и временные характеристики интерфейса RS-485*

- 32 приемопередатчика при многоточечной конфигурации сети (на одном сегменте; максимальная длина линии в пределах одного сегмента сети: 1200 метров);
- только один ПД активный;
- максимальное количество узлов в сети – 250 с учетом повторителей;
- тип приемопередатчиков – дифференциальный, потенциальный;
- *скорость обмена/длина линии связи:* 62,5 кбит/с 1200 м (одна ВП); 375 кбит/с 300 м (одна ВП); 500 кбит/с; 1000 кбит/с; 2400 кбит/с 100 м (две ВП); 10000 кбит/с 10 м.

*Примечание.* Скорости обмена 62,5 кбит/с, 375 кбит/с, 2400 кбит/с оговорены стандартом RS-485. На скоростях обмена свыше 500 кбит/с рекомендуется использовать экранированные ВП.

Протокол связи RS-485 является наиболее широко известным промышленным стандартом, использующим двунаправленную *сбалансированную* линию передачи. Он поддерживает *многоточечные* соединения, обеспечивая создание сетей с количеством узлов до 32 и передачу на расстояние до 1200 м. Использование повторителей позволяет увеличить расстояние передачи еще на 1200 м или добавить еще 32 узла. Стандарт RS-485 поддерживает *полудуплексную* связь. Для передачи и приема данных достаточно одной витой пары.

Он стал основой для создания целого семейства промышленных сетей (*Profibus DP, Modbus, BitBus* и др.). На его базе реализованы интерфейсы во многих ПРК и промышленных компьютерах, в том числе интеграция ПРК семейства КОНТАР. Главное отличие RS-485 от RS-232 — возможность объединения нескольких устройств.

Передача данных - со скоростью до 10 Мбит/с; максимальная дальность зависит от скорости: при 10 Мбит/с максимальная длина линии — 120 м, при 100 кбит/с - 1200 м.

*Количество устройств, подключаемых к одной линии интерфейса,* зависит от типа примененных в устройстве приемопередатчиков. Один ПД рассчитан на управление 32 стандартными ПР. Однако при выборе ПР со входным сопротивлением 1/2, 1/4, 1/8 от стандартного, общее число устройств может быть увеличено соответственно: 64, 128 или 256.

*Протоколы и разъемы.* Стандарт не нормирует формат информационных кадров и протокол обмена. Наиболее часто для передачи байтов данных используются те же форматы, что и в интерфейсе RS-232: стартовый бит, биты данных, бит паритета (если нужно), стоповый бит. *Протоколы* обмена в большинстве систем работают по принципу "*Ведущий - Ведомый*". Одно устройство на магистрали является ведущим (*Master*) и инициирует обмен посылкой запросов подчиненным устройствам (*Slave*), которые различаются логическими адресами. Одним из популярных протоколов является протокол *Modbus RTU*.

В *табл.* 9.4 и 9.5 приведены сравнительные характеристики рассмотренных интерфейсов.

Табл. 9.4. Характеристики стандартных физических интерфейсов			
Стандарт	Вид подключения	Скорость передачи	Длина линии без повторителей, м
RS-232C	Точка-точка	19,2 Кбит/с; 9,6 Кбит/с; 1,2 Кбит/с	15; 300; 2000
RS-422	Точка-точка	10 Мбит; 100 Кбит/с	13; 1300
RS-485	Многоточка	10 Мбит/с; 1 Мбит/с; 100 Кбит/с	13; 50; 1300

Таблица 9.5		
<i>Стандартные параметры интерфейсов</i>	<i>RS-422</i>	<i>RS-485</i>
Режим работы	Дифференциальный	Дифференциальный
Допустимое число передатчиков (Tx)/ приемников (Rx)	1 / 10	32 / 32
Максимальная длина кабеля	1200 м	1200 м
Максимальная скорость передачи данных	10 Мбит/с	10 Мбит/с
Диапазон напряжений "1" передатчика	+2...+10 В	+1.5...+6 В (5 ?)
Диапазон напряжений "0" передатчика	-2...-10 В	-1.5...-6 В (5 ?)
Диапазон синфазного напряжения передатчика	-3...+3 В	-1...+3 В
Допустимый диапазон напряжений приемника	-7...+7 В	-7...+12 В
Пороговый диапазон чувствительности приемника:	±200 мВ	±200 мВ
Максимальный ток короткого замыкания драйвера	150 мА	250 мА
Допустимое сопротивление нагрузки передатчика	100 Ом	54 Ом
Входное сопротивление приемника	4 кОм	12 кОм
Максимальное время нарастания сигнала передатчика	10% бита	30% бита

**Интерфейс "токовая петля".** Существуют последовательные интерфейсы, где информативен ток, протекающий по общей цепи передатчик-приемник ("токовая петля") – в них для представления сигнала используют ток в двухпроводной линии, соединяющей ПР и ПД. Логической 1 (состоянию "включено") соответствует протекание тока 4-20 мА, а логическому 0 - отсутствие тока. Такое представление сигналов для описанного выше формата асинхронной посылки позволяет обнаружить обрыв линии - ПР заметит **отсутствие стоп-бита (обрыв линии действует как постоянный логический 0)**. ПД является дискретно переключаемым источником тока. Токовая петля *позволяет* увеличить помехозащищенность и передавать сигналы по линии длиной до 3 км.

Токовая петля с гальванической развязкой позволяет передавать сигналы на расстояния до нескольких километров, но при *невысоких* скоростях: выше 19 200 бит/с не используют, а на километровых расстояниях допустима скорость до 9600 бит/с и меньше. Т.к. интерфейс требует пары проводов для каждого сигнала, обычно используют только два сигнала последовательного интерфейса (4-проводная линия). В случае двунаправленного обмена применяются только сигналы передаваемых и принимаемых данных, а для управления потоком используется программный метод.

### **Интерфейс I<sup>2</sup>C**

Интерфейс I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*), разработанный фирмой *Philips*, служит для организации синхронной последовательной шины, обеспечивающей двустороннюю передачу данных между подключенными устройствами по двум сигнальным линиям и возможностью адресации до 128 устройств. Передача данных может быть как одноадресной, к выбранному устройству, так и широковещательной. Позволяет эффективно объединять устройства на уровне интегральных схем (ИС). В настоящее время он стал фактическим промышленным стандартом для устройств различного назначения. Шина I<sup>2</sup>C очень удобна **для обмена небольшими объемами данных**.

Устройства, совместимые с I<sup>2</sup>C, имеют интерфейс прямо на микросхеме. Физически шина содержит две сигнальные линии, одна из которых предназначена для передачи тактового сигнала, вторая для обмена данными. Для управления линиями применяются выходные каскады с открытым коллектором. **Длина соединительных линий** в стандартном режиме может **достигать 2-х метров**, скорость передачи - до 100 кбит/с.

В I<sup>2</sup>C определены 3 режима передачи: *стандартный* - со скоростью 0-100 Кбит/с, *быстрый* - со скоростью 0-400 Кбит/с, *высокоскоростной* - со скоростью до 3,4 Мбит/с.

В обменах участвуют 2 устройства — *ведущее (Master)* и *ведомое (Slave)*, при этом любой из них может выступать в роли и *передатчика (ПД)*, и *приемника (ПР)*. Протокол допускает наличие на шине нескольких ведущих устройств и имеет простой механизм арбитража (*разрешения коллизий*).

Таким образом, можно отметить следующее:

- каждое устройство, подключенное к шине, имеет свой уникальный адрес; на протяжении всего времени работы шины имеет место простая связь вида *Master/Slave*; *Master* может работать и как ПР, и как ПД; используются две сигнальные линии;
- это *мульти-мастерная* шина, предусматривающая предотвращение ошибок и разрешение конфликтов, когда два или более мастера одновременно пытаются начать передачу данных;
- двунаправленная передача данных (8-битная) производится на скоростях до 100 Кб/с в стандартном режиме или до 400 Кб/с в ускоренном режиме;
- шина поддерживает различные виды интегральных схем (например, *NMOS, CMOS, bipolar*).

**Последовательный периферийный интерфейс SPI (Serial Peripheral Interface, SPI bus** - шина SPI) - последовательный *синхронный* стандарт передачи данных в режиме полного дуплекса (компания *Motorola*) для обеспечения простого и недорогого сопряжения *микроконтроллеров* и *его периферии* (например, в ПРК КРОСС). Иногда его называют *четырёхпроводным* интерфейсом.

В отличие от стандартного последовательного порта, SPI является *синхронным* интерфейсом, в котором любая передача синхронизирована с общим тактовым сигналом, генерируемым ведущим устройством. Принимающая периферия (ведомая) синхронизирует получение битовой последовательности с тактовым сигналом. К одному последовательному периферийному интерфейсу ведущего устройства-микросхемы может присоединяться несколько микросхем. Ведущее устройство выбирает ведомое для передачи, активируя сигнал «выбор кристалла» на ведомой микросхеме. Периферия, не выбранная процессором, не принимает участие в передаче по SPI.

В SPI используются четыре цифровых сигнала (*рис. 9.10*):

- выход ведущего, вход ведомого; передача данных от ведущего устройства ведомому (MOSI/SI);
- вход ведущего, выход ведомого; передача данных от ведомого устройства ведущему (MISO/SO);
- последовательный тактовый сигнал; передача тактового сигнала для ведомых (SCLK/SCK);
- выбор микросхемы, выбор ведомого (CS или SS).

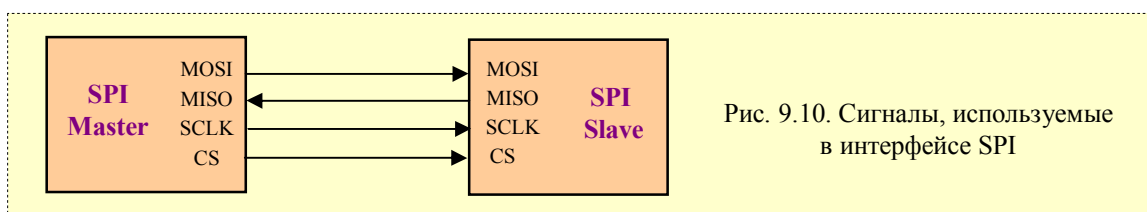


Рис. 9.10. Сигналы, используемые в интерфейсе SPI

**Примечание:** Следует отметить, что существуют преобразователи сигналов для согласования рассмотренных выше (этих родственных) интерфейсов.

### **Локальные промышленные сети (ЛПС) на основе интерфейса RS-485**

Этот *интерфейс* - один из наиболее распространенных стандартов физического уровня связи (первый уровень модели OSI). Сеть, построенная на его основе, представляет собой приемопередатчики, соединенные при помощи витой пары. Поэтому он широко используется для соединения ПРК и другого оборудования.

На *рис. 9.11* изображена локальная сеть на основе RS-485, объединяющая несколько приемопередатчиков. При подключении следует правильно присоединить сигнальные цепи, обычно называемые А и В. Переплюсовка не страшна, но устройство работать не будет.

**Общие рекомендации:** Лучшей СПД является ВП. Концы кабеля должны быть заглушены *терминальными резисторами* (обычно 120 Ом). Сеть должна быть проложена по *топологии шины*.

**Кабель** представляет собой балансную систему (*рис. 9.12*), в которой помимо двух проводников для передачи сигнала, используется «земляной» провод.

Устройства следует подключать к кабелю проводами *минимальной длины*. ВП является оптимальным решением для прокладки сети, т.к. обладает наименьшим паразитным излучением сигнала и хорошо защищена от наводок. В условиях повышенных внешних помех применяют кабели с экранированной ВП, при этом экран кабеля соединяют с защитной «землей» устройства.

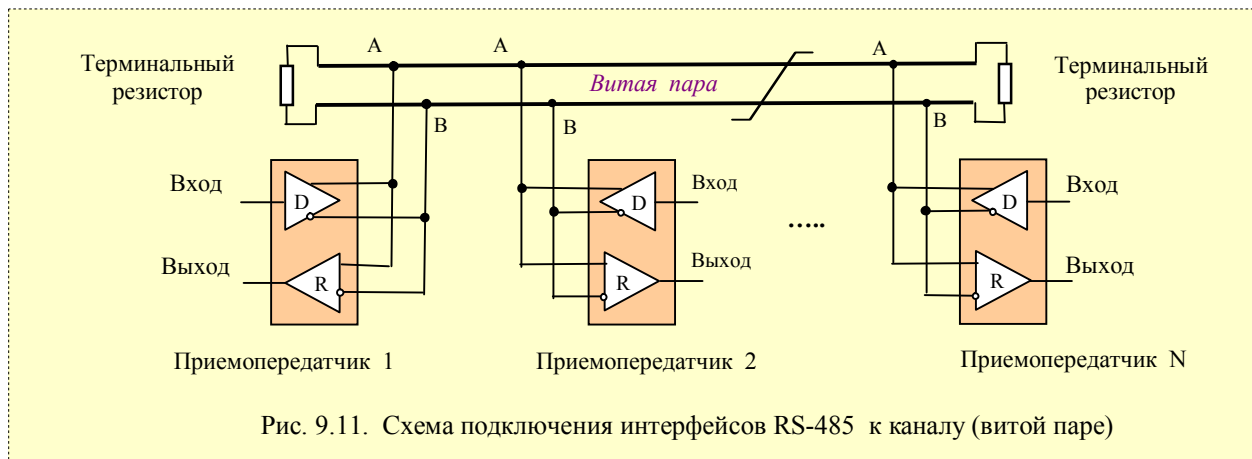


Рис. 9.11. Схема подключения интерфейсов RS-485 к каналу (витой паре)

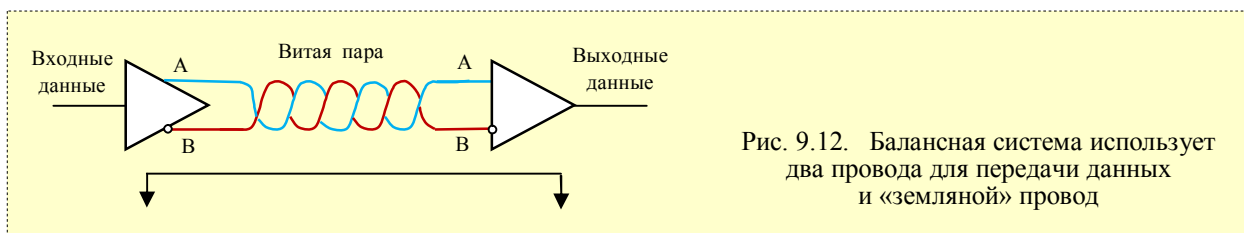


Рис. 9.12. Балансная система использует два провода для передачи данных и «земляной» провод

**Согласование** - Терминальные резисторы обеспечивают согласование "открытого" конца кабеля с остальной линией, устраняя отражение сигнала. Номинальное сопротивление резисторов соответствует волновому сопротивлению кабеля, и для кабелей на основе ВП обычно составляет 100 - 120 Ом. Например, широко распространённый кабель UTP-5, используемый для прокладки *Ethernet*, имеет импеданс 100 Ом. Специальные кабели для RS-485 марки *Belden* 9841 ... 9844 - 120 Ом.

RS-485 использует балансную (дифференциальную) схему передачи сигнала. Это означает, что уровни напряжений на сигнальных цепях A и B меняются в противофазе, как показано на **рис. 9.13**.

Передатчик должен обеспечивать уровень сигнала 1,5 В при максимальной нагрузке (32 стандартных входа и 2 терминальных резистора) и не более 6 В на холостом ходу. Уровни напряжений измеряют дифференциально, один сигнальный провод относительно другого. На стороне приемника RS-485 минимальный уровень принимаемого сигнала должен быть не менее 200 мВ.

ПД RS-485 рассчитан на управление одной, правильным образом согласованной, витой парой. Хотя ПД и может при ряде обстоятельств управлять более чем одной ВП, это не предусмотрено спецификацией.

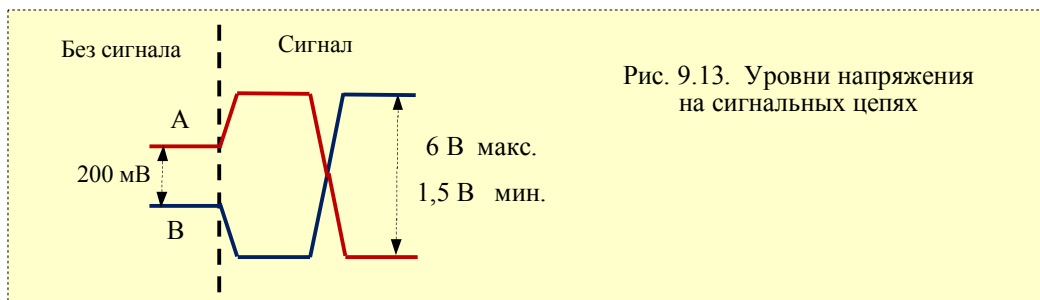


Рис. 9.13. Уровни напряжения на сигнальных цепях

Как уже упоминалось, приемники большинства *микросхем* RS-485 имеют пороговый диапазон распознавания сигнала на дифференциальных входах  $\pm 200$  мВ. Если  $|U_{AB}|$  меньше порогового (около 0), то на выходе RO приемника могут быть произвольные логические уровни из-за несинфазной помехи. Такое может случиться либо при отсоединении ПП от линии, либо при отсутствии в линии активных ПД, когда не задается уровень. Чтобы в этих ситуациях избежать выдачи ошибочных сигналов на приемник UART, необходимо на входах A-B гарантировать разность потенциалов  $U_{AB} > +200$  мВ. Это смещение при отсутствии входных сигналов обеспечивает на выходе приемника логическую "1", поддерживая, таким образом, уровень стопового бита.

*О выборе протокола связи.* Основная задача в организации протокола - заставить все устройства различать управляющие байты и байты данных. К примеру, ведомое устройство, получая по линии поток байтов, должно понимать, где начало посылки, где конец и кому она адресована. Протоколов существует множество и можно придумать еще больше, но лучше пользоваться наиболее употребительными из них. Одним из стандартных протоколов последовательной передачи является **MODBUS**, его поддержку обеспечивают многие производители ПРК.

По природе интерфейса RS-485 устройства не могут передавать одновременно - будет конфликт передатчиков. Следовательно, требуется распределить между устройствами право на передачу. Отсюда основное деление: *централизованный* (одномастерный) обмен и *децентрализованный* (многомастерный).

*В централизованной сети* одно устройство всегда ведущее (Master). Оно генерирует запросы и команды остальным - ведомым устройствам (Slave). Ведомые устройства могут передавать только по команде ведущего. Как правило, обмен между ведомыми идет только через ведущего, хотя для ускорения обмена можно организовать передачу данных от одного ведомого к другому по команде ведущего.

*В децентрализованной сети* роль ведущего может передаваться от устройству к устройству либо по некоторому алгоритму очередности, либо по команде текущего ведущего к следующему (передача маркера ведущего). При этом ведомое устройство может в своем ответе ведущему передать запрос на переход в режим ведущего и ожидать разрешения или запрета.

### Рассмотрим некоторые ЛПС более подробно

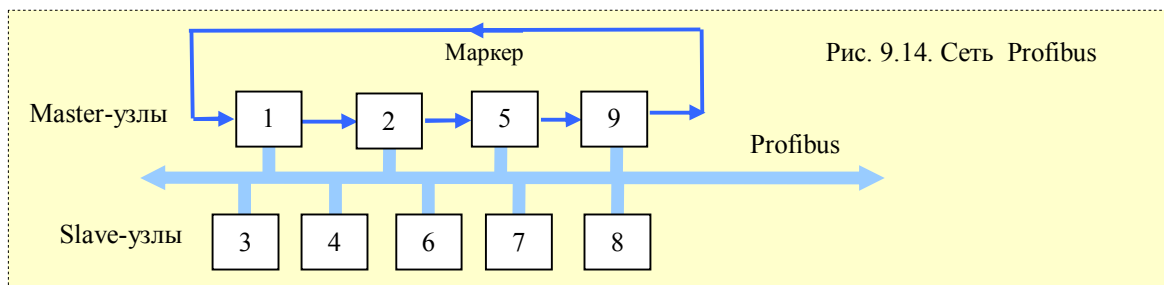
**Profibus (Process Field Bus)** - это общее название открытой высокоскоростной ЛПС. Она широко распространена в управлении промышленным оборудованием, т.к. позволяет объединять разрозненные устройства автоматизации в единую систему на уровне датчиков и приводов. Выделяются следующие протоколы: **Profibus-FMS**, **Profibus-DP**, **Profibus-PA**.

В **Profibus** используется *гибридный метод доступа* в структуре Master/Slave и децентрализованная процедура передачи *маркера*. Сеть может состоять из 122 узлов, из которых 32 могут быть Master-узлами. Адрес 0 зарезервирован для режима широкого вещания. Общая схема Profibus-сети представлена на **рис. 9.14**. Она состоит из ведущих и ведомых узлов. Ведущий узел может контролировать шину, то есть может передавать сообщения, когда он имеет право на это (то есть когда у него есть маркер). Ведомый узел может лишь распознавать полученные сообщения или передавать данные после соответствующего запроса. Маркер циркулирует в логическом кольце, состоящем из ведущих устройств. Если сеть состоит только из одного ведущего, то маркер *не передаётся* (в таком случае в чистом виде реализуется система Master/Slave).

Сеть в минимальной конфигурации может состоять либо из двух ведущих, либо из одного ведущего и одного ведомого устройства.

В среде Master-узлов по возрастающим номерам узлов передается маркер, который предоставляет право ведения циклов чтения/записи на шине. Все циклы строго регламентированы по времени, организована продуманная система тайм-аутов. Протокол хорошо разрешает разнообразные коллизии на шине.

При передаче данных обнаружение и исправление ошибок ведется на основе хеммингова расстояния 4, т.е. могут быть *обнаружены* 3 ошибочных бита, а один бит может быть *восстановлен*.



**Profibus-FMS** - основное *назначение* передача *больших объемов* данных *со средней скоростью* (цикл шины менее 100 мс). **Profibus-DP** - упрощенный протокол для *высокоскоростной* передачи



коротких сообщений, используется на нижнем (датчиковом) уровне управления (цикл шины менее 10 мс), решение задач в реальном времени. DP-протокол позволяет организовать одномастерную (один Master и до 126 Slaves) и многомастерную конфигурацию (несколько Master'ов и Slaves). **Profibus-PA** (Process Automation) - это расширение DP-протокола в части технологии передачи, основанной не на RS-485 (ориентирован на технологию передачи во взрывоопасных средах). Он может использоваться в качестве замены старой 4-20 мА-технологии связи. Для коммутации устройств нужна всего одна витая пара, которая может одновременно использоваться **и для информационного обмена, и для запитывания устройств.**

С помощью Profibus устройства разных производителей могут работать друг с другом без специальных интерфейсов. **Физический уровень** - отвечает за характеристики физической передачи (электрическая сеть на основе экранированной ВП; оптическая сеть на основе ВОК; инфракрасная сеть). Скорость передачи по ней может варьироваться от 9,6 Кбит/с до 12 Мбит/с. **Канальный уровень** - определяет протокол доступа к шине, реализуемый на втором уровне (Profibus-FDL) в виде процедур доступа **с помощью маркера.** **Прикладной уровень** - отвечает за прикладные функции.

На одном физическом канале одновременно могут работать устройства Profibus всех трех типов. Рабочая скорость передачи может быть выбрана в диапазоне 9,6-12000 Кбит/с.

Технические характеристики ЛПС Profibus (табл. 9.6) обеспечивают ей широкое применение. **Достоинства:** простая установка (двухпроводные линии), высокая скорость передачи данных (до 12 Мбит/с), разнообразие топологий сети (шина, кольцо, звезда), реализуется с использованием любого процессора, имеющего **асинхронный** последовательный интерфейс.

Таблица 9.6. Основные характеристики сети Profibus	
Прототип интерфейса	RS-485 (1-2 витые пары)
Параметры сигналов	По стандарту EIA RS-485
Физический интерфейс	Экранированная витая пара или оптоволокно
Топология	Шина, кольцо, звезда
Длина линии/Число повторителей	200 - 1200 м без повторителей / до 3 повторителей
Максимальная длина линии	До 4,8 км с тремя повторителями – при использовании ВП, до 22 км – при использовании ВОК
Скорость передачи (зависит от длины линии между 2 узлами)	9,6; 19,2; 90 Кбит/с – до 1,2 км; 187,5 Кбит/с – до 1 км; 500 Кбит/с – до 400 м; 1,5 Мбит/с – до 200 м; 12 Мбит/с - для ВОК
Основной протокол доступа	Передача маркера
Максимальное число узлов	До 127, из которых 32 могут относиться к ведущим
Способ передачи сигнала	Полудуплексный асинхронный
Формат кадра информации	Стартовый бит, 8 бит данных, бит четности, стоповый бит

**Ethernét** (от лат. *aether* — эфир). Использование Ethernet и TCP/IP в средствах промышленной автоматизации является весьма перспективным.

#### Сетевая технология Ethernet – как объединяющее аппаратно-программное средство

Современные АСУП используют для коммуникаций сети Ethernet и протоколы TCP/IP, а информационные системы — технологии Internet. В частности, внедрение Ethernet на уровне промышленных систем позволяет предприятиям передавать собираемую информацию на уровень АСУП для применения в различных приложениях. К тому же Ethernet — самая популярная сетевая технология.

**Преимущества Ethernet:**

- **простота интеграции с Internet,**
- возможность включения в сеть самых разнообразных устройств и централизованного управления ими.

Ethernet и TCP/IP начинают вытеснять сложные «индустриальные» протоколы, постепенно уступающие место более открытым решениям.

#### Ethernet в роли промышленной сети

Оборудование Ethernet относительно недорого и доступно, а протоколы TCP/IP - проще **по сравнению с запутанными и многочисленными стандартами дорогих и сложных ЛПС.** Согласно исследованию (США) потенциально Ethernet способен обслуживать до 70% их производственных приложений.

Как стандартная технология в области построения промышленных сетей и PCY, Ethernet проникает и на уровень ПРК, устройств сопряжения с ДЧ и ИМ.

В последнее время все больше говорят об архитектуре Ethernet промышленного применения — *Industrial Ethernet*. Будучи универсальным средством организации коммуникационных интерфейсов в системах автоматизации, Industrial Ethernet предлагает широкие возможности реализации различных топологий с разнообразными подключаемыми устройствами при невысокой стоимости в расчете на устройство, хорошо интегрируется с технологией Internet со всеми ее достоинствами, включая высокую масштабируемость и возможности удаленного управления.

При многих преимуществах применения в промышленных системах, Ethernet имеет и ряд *недостатков*. Он позволяет передавать информацию с высокой скоростью и обслуживать крупные инсталляции, но для передачи небольших объемов данных и объединения простых устройств больше подходят другие сетевые технологии, поскольку в Ethernet в этом случае достаточно велики производительные потери, ведь протоколы TCP/IP и сети Ethernet характеризуются значительным уровнем накладных расходов.

При подключении большого числа устройств сеть Ethernet будет функционировать медленнее специализированных ЛПС наподобие Profibus.

Стандартный вариант Ethernet обычно не подходит для АСУ ТП из-за отсутствия гарантированного времени доставки. Эту проблему можно свести к минимуму, но в критичных системах, где требуется гарантированное время реакции, использование Ethernet будет «косвенным», т. е. с его помощью можно объединять отдельные подсистемы, отвечающие за жизненно важные узлы, но внутри них, вероятно, будут применяться иные технологии.

Таким образом, Ethernet ждет успех в многоуровневых системах для мониторинга каких-либо параметров или, например, в интеллектуальных зданиях, когда время реакции не столь критично. Подобных систем появляется все больше — ПРК с поддержкой Ethernet выпускают как зарубежные, так и российские производители. Технология получит более широкое распространение в промышленных системах, но не в качестве единственной шины, скорее, она будет играть роль некоторой интегрирующей среды.

Для ЛПС повышенная надежность — одно из обязательных условий, так как любые отказы и сбои чреваты очень серьезными последствиями. Стандартные кабели и разъемы RJ-45 обычно имеют неадекватные физические и электрические характеристики: они слишком уязвимы для производственного применения и более подвержены электромагнитным помехам, чем большинство разъемов промышленного типа, а заводское оборудование нередко становится источником сильных электрических помех. В заводских условиях, как правило, требуются разъемы специального исполнения (рис. 2). Однако выход есть — разнообразные адаптеры позволяют превратить разъемы RJ-45 в пылеводонепроницаемые. Производители выпускают также бронированные кабели Fast Ethernet и разъемы RJ-45 в исполнении IP67. Надежность Ethernet обеспечивается резервированием линий и введением избыточных компонентов.

Еще одну потенциальную опасность при внедрении Ethernet на промышленном уровне специалисты видят в менее надежной защите. Трехуровневые производственные системы с отдельными уровнями — *информационным, управления и устройств* — обеспечивают более сильную защиту и физическое разделение трафика. По мнению экспертов, их объединение в единую магистраль Ethernet, удешевляя решение, создает определенный риск. Для повышения защиты системы управления магистральную сеть Industrial Ethernet и офисную систему автоматизации разделяют брандмауэрами. Иногда из этих соображений к Ethernet обращаются только для сбора информации от датчиков, но не для управления исполнительными механизмами.

Если речь идет о модернизации промышленной системы, то важное значение приобретают также такие моменты, как наличие более старых интерфейсов и инфраструктуры. Насколько оправдана замена существующей кабельной проводки линиями Ethernet? Кабельная инфраструктура может функционировать на протяжении десятков лет, а средства в нее вкладывались в течение многих лет. Интерфейсы же к унаследованным сетям и промышленным шинам нередко достаточно дороги.

#### *Промышленные протоколы «поверх IP» и Industrial Ethernet*

Ethernet или TCP/IP еще не гарантирует взаимодействия устройств. Ethernet, как и RS-232, лишь обеспечивает возможность передачи сообщений. Сами сообщения передаются с помощью транспортных протоколов. В случае Ethernet — это практически повсеместно TCP и UDP. Однако нужны протоколы и более высокого уровня. Данные ДЧ и сенсоров можно упаковывать в существ-

вующий формат ЛПС и передавать средствами TCP/IP. Такое направление активно развивается в отрасли. Многие специалисты полагают, что применяемые в сетях Ethernet протоколы прикладного уровня недостаточно хорошо определены и не реализуют всех необходимых для систем автоматизации функций. Проблему пытаются решить переносом в среду Ethernet и TCP/IP существующих протоколов автоматизации. Часто для этого прибегают к инкапсуляции: - **данные промышленных протоколов вставляются в кадры TCP или UDP.**

Единый стандарт обмена данными и межсерверных коммуникаций для Industrial Ethernet и унаследованных промышленных протоколов под названием OPC Data Exchange Standard for Ethernet разрабатывается ассоциацией OPC Foundation. Он обеспечивает взаимодействие разных сетей Industrial Ethernet и поддерживается ассоциациями Open DeviceNet Vendor Association, ControlNet International и Profibus International. Как ожидается, его спецификация появится в ближайшее время.

По мнению специалистов, создание подобных стандартов упростит разработку совместимых технологий связи, единых спецификаций на сетевые компоненты и кабельную инфраструктуру.

### *Ethernet как верхний уровень интегрированной системы автоматизации*

Ethernet все чаще оказывается востребован в сфере автоматизации совместно с другими промышленными шинами. В этом случае сетевая инфраструктура обычно состоит из двух уровней. На верхнем реализуется сеть Ethernet, которая может объединять ПК, серверы, устройства печати и хранения данных, коммутаторы и другие телекоммуникационные устройства. Через промышленные компьютеры или ПРК она связывается с промышленной сетью (например, Profibus, DeviceNet или Lonworks), объединяющей агрегаты, ДЧ, ИМ. Иногда создается еще и третий уровень: через шлюз к промышленной сети подключаются устройства, у которых имеются только порты RS-485 или RS-232 (рис. 3).

В качестве примера подобного подхода можно привести недавно реализованный компанией «ЭкоПрог» проект «интеллектуального здания» «Галс-Тауэр» на 1-й Тверской-Ямской улице в Москве. Верхним уровнем управления и контроля в данной системе стала сеть Ethernet с подключенным к ней сервером и ПК (рабочим местом оператора), а нижний представлен многофункциональной распределенной системой European Installation Bus (EIB) на базе RS-232, связывающей различные датчики и исполнительные устройства. В качестве интерфейса между этими уровнями выступает промышленный микрокомпьютер производства компании Tridium. В результате удалось интегрировать системы электроснабжения, отопления, вентиляции, кондиционирования, водоснабжения и канализации, лифтовые системы и системы телекоммуникаций, составляющие инженерную инфраструктуру бизнес-центра, и обеспечить единое управление целым комплексом оборудования.

Чтобы использовать существующие устройства систем автоматизации, несколько сегментов стандартных промышленных шин можно объединить в сегменты Industrial Ethernet с помощью шлюзов. Правда, при этом возникает опасность появления достаточно сложных неоднородных сетей, где не всегда достигаются требуемые параметры режима реального времени.

Как уже отмечалось выше, к важным преимуществам объединения Ethernet с промышленными сетями относится возможность интеграции систем АСУ ТП и АСУП. Получаемая из производственной системы нижнего уровня информация может передаваться на верхний и сохраняться в БД для использования в системах ERP или CRM. Для доступа к производственным данным и процессам можно задействовать корпоративную сеть Intranet. Для этого специалисту достаточно иметь в своем распоряжении обычный ПК со стандартным браузером. Данные для обработки или анализа могут передаваться на уровень АСУП из системы SCADA. Чтобы эффективно управлять производством, получать информацию о выходе готовой продукции, состоянии оборудования или параметрах производственных процессов, их доставка должна осуществляться в реальном (или близком к реальному) времени.

В решениях ряда производителей Industrial Ethernet совместим с другими стандартами промышленных сетей, например Profibus и ASI. Так, устройства предлагаемой компанией Siemens сетевой архитектуры Simatic NET обеспечивают интеграцию разных уровней системы автоматизации: уровня ДЧ, «полевого» уровня (Profibus), уровня цеха и управления.

### *Заключение*

Несмотря на свойственные ей проблемы, шина Ethernet находит все большее распространение в системах управления производственным оборудованием. Поддержка Ethernet, протоколов TCP/IP и

SNMP реализуется во встроенных устройствах и ПРК, что позволяет включать их в сети Ethernet или обеспечивать взаимодействие с оборудованием различного класса. Постепенное внедрение технологий Ethernet поможет, по мнению производителей, сэкономить деньги и, исключив дополнительные протоколы, построить более однородные сети. Развитие технологии и улучшение характеристик во многих случаях позволяет эффективно использовать ее в качестве промышленной сети. Благодаря повышенной пропускной способности, высокопроизводительным устройствам коммутации и маршрутизации, решению проблемы детерминизма, эта открытая технология становится сильным конкурентом другим промышленным локальным сетям и шинам. Как показывают независимые исследования, архитектура Industrial Ethernet не уступает распространенным промышленным сетям по большинству характеристик, в том числе по гарантированному времени доставки сообщений.

По прогнозам аналитиков, в области встраиваемых систем технология TCP/IP будет доминировать уже в ближайшем будущем — нас ждет бум Industrial Ethernet. Она не требует больших затрат и открывает широкие возможности унификации решений в самых разных отраслях. На основе TCP/IP выпускается большое число продуктов и устройств. Широкая доступность сетевых компонентов, тенденция объединения систем автоматизации производственных процессов и распространенных сетевых технологий открывают интересные возможности применения на производственных предприятиях привычных протоколов глобальных и локальных сетей, стандартных средств управления. Это упрощает решение задач объединения разнородных сред передачи данных и устройств, помогает обеспечить их взаимодействие и централизованное управление. Вместо множества закрытых протоколов разработчики выбирают открытые стандарты TCP/IP и Ethernet. Именно открытость и независимость от патентованных решений будут, по мнению специалистов SWD, способствовать переходу к Ethernet.

В то же время, как отмечается, Ethernet в большей степени необходим крупным предприятиям, а для отдельных инсталляций или небольших проектов подойдут решения попроще, например на базе RS-485. Тем не менее технология Ethernet постепенно расширяет свое влияние в области автоматизации промышленных процессов и, по сути, превращается в основу следующего поколения сетей промышленной автоматики, интегрированных с офисными информационными сетями. Четкое разделение информационных систем и систем промышленной автоматизации становится все более условным, а значительное внимание, уделяемое производителями Ethernet и стандартным сетевым протоколам, говорит о том, что информационные технологии начинают играть в области промышленной автоматизации определяющую роль.

### ***Industrial Ethernet*** (*промышленная Ethernet*)

Современные требования к высокой пропускной способности коммуникационных каналов, к использованию открытых стандартов и к возможности межсетевой интеграции сделали технологию Ethernet основой для построения телекоммуникационной инфраструктуры не только в условиях офиса, но и в жестких условиях *на промышленных предприятиях*. Активное коммуникационное оборудование стандарта **Industrial Ethernet** разработано для применения в жестких условиях эксплуатации, предъявляющих особые требования к функциональным характеристикам и надежности техники.

***Industrial Ethernet*** применяют:

- для обмена данными между ПРК и системами человеко-машинного интерфейса;
- реже для обмена между ПРК;
- незначительно, для подключения к контроллерам удаленного оборудования (ДЧ и ИМ).

Процедура доступа - CSMA/CD. Однако метод CSMA/CD сдерживает ее применение, делает невозможным гарантию обмена короткими данными (единицы байт) с высокой частотой (миллисекундные циклы обмена).

Новый стандарт **ProfiNet**, включающий в себя Ethernet, как подмножество, устраняет эти недостатки - за счет дополнения стека протоколов обеспечивает временную синхронизацию сети.

В последнее время ЛПС **Ethernet** является одной из самых распространенных. Широко применяется при автоматизации зданий и в областях, не требующих высокой надежности.

Дополнение стека протоколов TCP/IP протоколом RFC 1006 обеспечивает **регулярную и частую передачу по сети небольших объемов информации**, что характерно для обмена данными между ПРК. С помощью специальных коммутаторов можно организовать кольцевую топологию, которая при обрыве восстанавливает связь, то есть находит новый путь для передачи данных.

#### Отличия от обычного Ethernet:

- удовлетворяет *специфическим требованиям промышленности*: усиленное экранирование кабелей, стойкость к агрессивным средам и т. п.;
- обеспечивает связь с подвижными объектами: *гибкие кабели, беспроводная связь*;
- обеспечивает регулярную и частую передачу по сети небольших объемов информации, что характерно для обмена данными между ППК;
- возможна организация кольцевой топологии, восстанавливающей связь при обрыве.

**ЛПС ASI (Actuator Sensor Interface)**. Это типичная открытая сенсорная (датчиковая) сеть - помехозащищённая сеть для *дискретных датчиков* малой производительности. Предназначена для передачи преимущественно *дискретных сигналов*. Является «открытой» технологией. Топология сети — любая. Для подключения датчиков разработан специальный плоский кабель с подключением под прокол изоляции (ножевые клеммы предусмотрены в конструкции модулей ввода-вывода).

#### Шина AS-интерфейса

AS-интерфейс является простой, экономичной, надёжной быстродействующей системой для связи практически всех современных ДЧ (2-х, 3-х и 4-хпроводные постоянного тока), а также специальных устройств AS-интерфейса на одной линии с первым уровнем контроля, например ППК или ПК. Управление системой не требует наличия специальных знаний об AS-интерфейсе. Упрощённое подсоединение кабеля AS-интерфейса снижает затраты по подключению, делая работу с системой более понятной и позволяет её расширять.

*Преимущества ASI*: надёжность передачи данных; безошибочное функционирование; защита от ошибок в обслуживании; надёжность диагностики; экономичность.

Версия AS-i 2.0 позволяет передавать *аналоговые* сигналы. Новейшей версией спецификации является AS-i 3.0.

Ее основная задача – связать в единую информационную структуру устройства самого нижнего уровня автоматизируемого процесса: датчики (ДЧ) и разнообразные исполнительные механизмы (ИМ) с системой ППК. Т.е. речь идет об использовании сети на самом нижнем уровне иерархии – *уровне управляемого объекта/процесса*. Поэтому *ASI-сеть* регламентирована международным стандартом как *открытая ЛПС нижнего уровня* системы.

Топологией ASI-сети может быть *шина, звезда, кольцо* или *дерево*. Логическим центром любой топологии является *ведущий узел* или Master-узел (ASI-Master), контролирующий всю работу сети. Гибкость управления достигается за счёт применения различных *ведущих* устройств, функции которых могут выполнять ППК, промышленные компьютеры или *модули связи (шлюзы) с сетями более высокого уровня* (например, ModBus, CANopen, ProfiBus и др.).

Часто ASI-Master оформляется в виде отдельной платы ППК или компьютера. В качестве физической СПД используется специальный *неэкранированный* двухпроводный кабель, в специальной мягкой резиновой оболочке, что делает его гибким и устойчивым к многократным изгибам. Он используется для подсоединения ДЧ, устанавливаемых на подвижных частях механизмов. Подключение новых компонентов производится методом прокалывания оболочки кабеля.

Существенно, что *ASI-сеть* обеспечивает как *опрос ДЧ и выдачу команд на ИМ, так и питание* всех сетевых устройств (должны использоваться только специальные блоки питания).

Каждый узел ASI-сети должен иметь *специальный интерфейсный модуль* с поддержкой ASI-протокола. Упрощённо ASI-сеть может выглядеть, как на *рис. 9.15, 9.16*, а в *табл. 9.7* приведены ее некоторые технические данные.

Для кодирования данных используется код Манчестер, что снижает влияние на ASI-кабель внешних возмущений. Адрес каждого устройства в сети записывается в его постоянной памяти.

*Компоненты ASI-сети*: ведущее сетевое устройство; ведомые устройства, которые, в зависимости от конструкции, разделяются на модули AS-интерфейса для подключения ДЧ и ИМ и ДЧ/ИМ со встроенным AS-интерфейсом; сетевой кабель; повторители и расширители; блоки питания; устройство для установки сетевых адресов всех ведомых устройств; программное обеспечение.

На *рис. 9.17, 9.18* приведены функциональная схема и некоторые топологии ASI-сети.

Принцип работы системы заключается в следующем: к специальному устройству (ПРК) подключаются ДЧ, ИМ, преобразователи. ПРК проверяет их состояние, и, согласно заложенному в него алгоритму, выдает команды *на включение/отключение* (в частности, на ИМ).

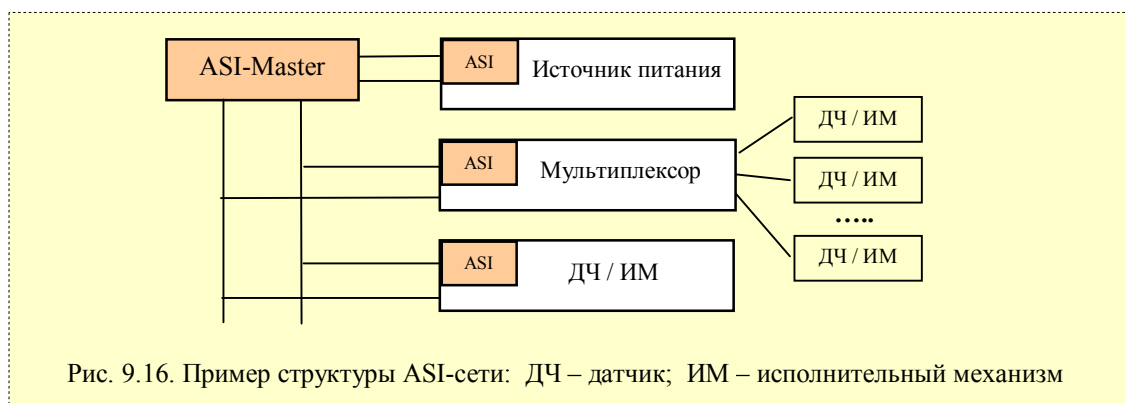
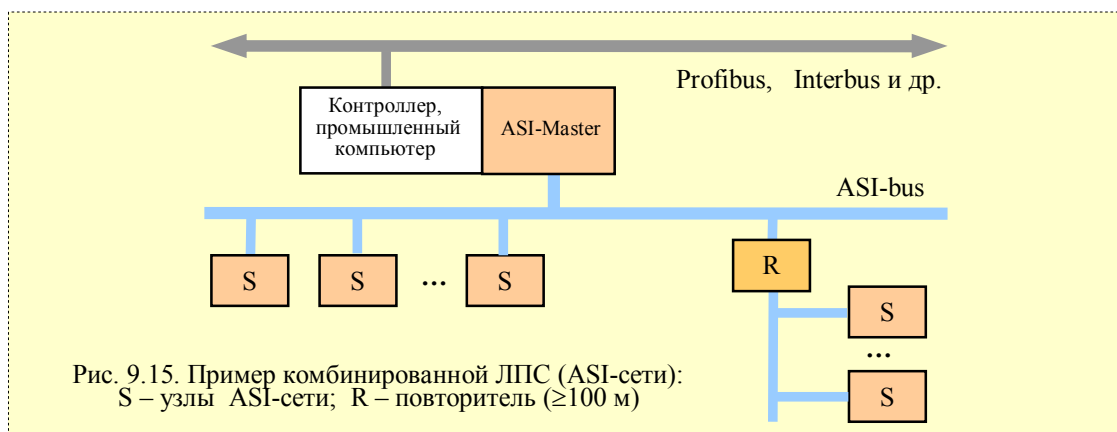


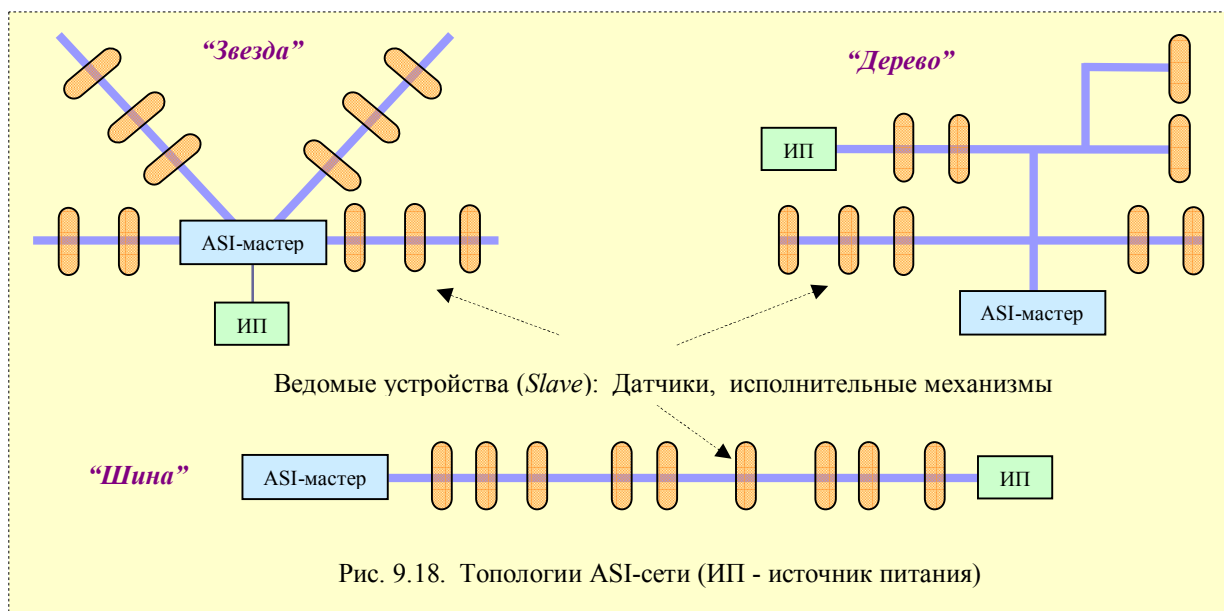
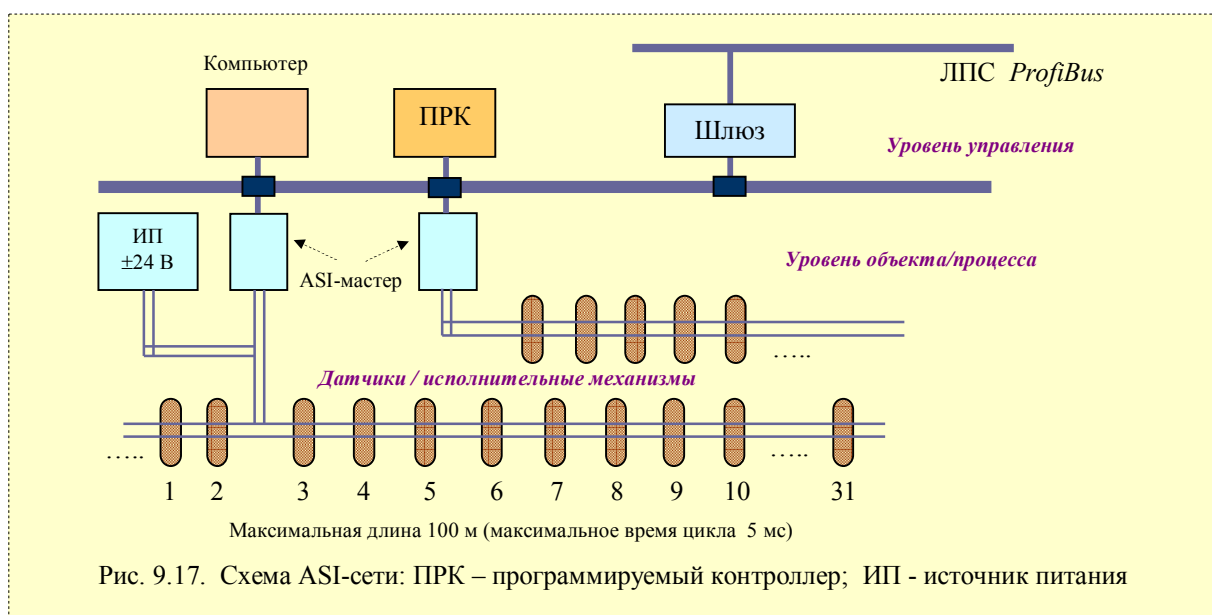
Таблица 9.7. Технические данные ASI-сети	
Топология	Шина, дерево, звезда, кольцо
Число ведомых устройств	До 62
Число подключаемых ДЧ и ИМ	До 4 ДЧ и 3 ИМ на одно ведомое устройство; до 248 ДЧ и 186 ИМ – на одно ведущее
Длина линии связи	Без повторителей – до 100 м; с повторителями – до 300 м
Электропитание	Через шину AS-интерфейса – 2,8 А (ном.); 8 А (макс.) при 29,5-31,6 В
Время цикла обновления данных	При 31 ведомом устройстве – не превышает 5 мс; при 62 ведомых устройствах – не превышает 10 мс.
ДЧ – датчики; ИМ – исполнительные механизмы	

ПРК постоянно осуществляет диагностику работы и состояния сетевых устройств. К одному ПРК подключаются до 31 устройства (для AS-I 2.0 – до 62). Питание устройств осуществляется через ПРК, линия связи между ПРК и устройствами 2-х проводная (т.е. информация передается по проводам питания). Для подключения предусмотрен специальный биполярный кабель.

Достоинством данной системы является высокая надежность, быстрота передачи информации, быстрое выявление ошибок в системе, простота монтажа и настройки системы, возможность включения в состав системы более высокого уровня, высокая помехозащищённость; дешевизна; широкая распространённость в мире и России.

ПРК может работать автономно или в составе системы более высокого уровня, передавать информацию и принимать управляющие сигналы.

В ASI-сети используется метод *доступа к ведомым устройствам*, основанный на их циклическом опросе (*polling*).



Под общей длиной кабеля понимается сумма длин всех ветвей сегмента сети, обслуживаемого *одним* ведущим устройством. Специальный расширитель позволяет удлинить кабель или разделить ветвь на группы. Если требуется большая длина кабеля, то можно использовать до двух повторителей, что обеспечит надежное соединение при суммарной протяженности линий связи до 300 м. При этом необходимо учитывать, что каждый сегмент требует отдельного источника электропитания.

Достаточная избыточность кода и знание фиксированных длин кадров позволяют распознавать: ошибки стартового или конечного бита, бита паритета, кода Манчестера, выход за пределы времени передачи (*time-out*) и задержки времени паузы; нарушение длины кадров.

#### Отличительные черты ASI-сети

- применима как для обмена данными, так и для подачи напряжения питания на ДЧ/ИМ;
- метод прокалывания изоляции упрощает монтаж кабеля и повышает его гибкость;
- циклический обмен данными ведущего устройства с 31 узлом сети – 5 мс;
- ведомыми устройствами могут быть ДЧ/ИМ со встроенным AS-интерфейсом, либо ASI-модули,

к которым можно подключить до 4 обычных ДЧ/ИМ;  
- при использовании стандартных ASI-модулей можно использовать до 124 ДЧ/ИМ; - и др.

ASI. Основная задача этой сети - связать в единую информационную структуру устройства самого нижнего уровня распределенной системы автоматизации, а именно: датчики и разнообразные исполнительные механизмы, имеющие соответствующий сетевой интерфейс. Название описываемой сети раскрывает ее предназначение: Actuator Sensor Interface (ASI) - интерфейс с датчиками и исполнительными механизмами.

Тенденция в построении распределенных систем автоматизации имеет явное стремление использовать технологии сквозного сетевого доступа. Система должна увязывать в сеть не только ППК, но уже желательно и датчики. Но эта увязка должна удовлетворять всем современным требованиям по надежности и открытости, предъявляемые к любой промышленной сети.

Сеть ASI эти задачи решает. С ее помощью можно строить системы, в которых датчики и контроллеры связаны одной сетью. Причем ASI имеет шлюзы в другие промышленные сети: PROFIBUS, INTERBUS-S и другие (см. рис. 5).

Топологией ASI-сети может быть шина, кольцо или дерево. Длина сегмента до 100 м. За счет повторителей длину сети и число узлов можно увеличивать. Цикл опроса для 31 узла укладывается в 5 мс.

Логическим центром любой топологии является MASTER-узел, который контролирует всю работу сети, организует обмен данными с ППК.

ASI-MASTER может быть организован на широком спектре ППК, через которые организуются шлюзы в промышленные сети более высокого уровня. Часто ASI-MASTER оформляется в виде отдельной платы контроллера или компьютера. Максимальное число узлов к одному MASTER-узлу - 31.

В качестве среды передачи используется пара обычных проводников. Скорость передачи ограничена до 167 Кбод. Сегодня появился специальный ASI-кабель, в котором оба проводника упакованы в специальную мягкую резиновую оболочку, которая делает этот кабель гибким и устойчивым к многократным изгибам. Этот кабель используется для подсоединения датчиков, устанавливаемых на подвижных частях механизмов. В сечении этот кабель выглядит так:

Для кодирования данных используется известный Манчестерский код, в котором "0" и "1" кодируются по переднему и заднему фронту сигнала. Такой тип кодирования снижает влияние на ASI-кабель внешних возмущений.

Адрес каждого сетевого устройства записывается в его постоянной памяти.

С тем чтобы обеспечить короткий ASI-цикл на низкой скорости передачи, был выбран наиболее компактный формат телеграммы:

**ЛПС HART** (Highway Addressable Remote Transducer – адресуемый дистанционный магистральный преобразователь) - это открытый стандарт, для организации цифровой передачи, **основанной на технологии 4-20 мА.**

HART-протокол позволяет передавать до 1200 бит/с. MASTER-узел дважды в секунду получает все обновленные данные с других узлов.

Итак, в HART-протоколе реализована схема отношений между узлами сети по принципу Master/Slave, то есть ведомый узел (Slave) может активизировать СПД только по запросу Master'a.

В HART-сети может присутствовать до 2 Master-узлов (обычно один). Второй Master, как правило, освобожден от поддержания циклов передачи и занят под связь с какой-либо системой контроля/отображения данных.

Стандартная топология организована по принципу "точка-точка" или "звезда". Для передачи данных по сети используются два режима: - по схеме "запрос-ответ", т.е. **асинхронный** обмен данными (один цикл укладывается в 500 мс); - все пассивные узлы непрерывно передают свои данные на Master-узел (время обновления данных в Master-узле 250-300 мс).

Возможно построение топологии типа "шина" (до 15 узлов), когда несколько узлов подключены на одну ВП.

При этом информационный сигнал Bell202 использует основные сигналы этих линий связи как "**транспорт**", т.е. передатчик добавляет FSK-модулированный сигнал к основному сигналу линии связи, а приемник фильтрует эти данные в месте приема. Так как сигнал Bell202 мало-



мощный, то он не вносит существенных изменений в основной сигнал линии связи. *Например, можно передавать* информационный сигнал с помощью модема Bell202 *по электросети 220 В*. При этом данный сигнал не будет мешать работе потребителей энергии, а они смогут принимать информацию через другой модем Bell202, подключенный к этой электросети.

Это сеть для *аналоговых датчиков* и их настройки.

*Основные функции:*

- протокол HART позволяет передавать одновременно аналоговый и цифровой сигнал по одной ВП, сохраняя полную совместимость и надежность существующих аналоговых линий 4-20 мА;
- можно *дистанционно осуществлять диагностику и настройку* полевых приборов, используя для этого коммуникатор или компьютер с соответствующим ПО; это особенно удобно, когда ДЧ расположены в труднодоступных местах, на больших расстояниях друг от друга, а также в условиях вредных или опасных производств;
- *возможность подключения к одной линии нескольких ДЧ*.
- сокращаются расходы на кабельную продукцию, установку, наладку и на текущее техническое обслуживание;
- удобно работать с многопараметрическими приборами, т.к. можно получать информацию о нескольких переменных процесса по одной паре проводов;
- приборы, поддерживающие HART-протокол, могут устанавливаться *во взрывоопасных зонах* класса 0, класса 1 и класса 2;
- *оперативная информация о состоянии прибора*; непрерывная самодиагностика обеспечивает высокую надежность оборудования;
- *доступ к параметрам прибора*. Имеется возможность прочитать любые параметры датчика: значения переменных, единицы и диапазон измерения, индивидуальные параметры прибора.

Существует два режима работы ДЧ, поддерживающих HART протокол:

- режим передачи цифровой информации *одновременно с аналоговым сигналом*; при этом можно удаленно (до 3000 м) осуществлять настройку и конфигурирование ДЧ и оператору нет необходимости обходить все ДЧ - их можно настроить со своего рабочего места;
- *в многоточечном режиме* датчик передает и получает *информацию только в цифровом виде*; информация о переменных процесса считывается по HART-протоколу.

К одной паре проводов может быть подключено до 15 ДЧ. Их количество определяется длиной и качеством линии, а также мощностью блока питания датчиков. Все ДЧ в многоточечном режиме имеют свой уникальный адрес от 1 до 15.

*Метод передачи данных на основе HART-протокола* обеспечивает дистанционное получение данных и мониторинг. При традиционном подходе сбор, обработку и передачу данных к централизованным средствам мониторинга осуществляет SCADA-система. В настоящее время многие вновь разрабатываемые устройства включают встроенный МП, который управляет процессом измерений, выполняет первичную обработку информации, согласование сигналов и др. (их называют "*интеллектуальными*").

Основное назначение HART-протокола - организация обмена данными на скорости 1200 бит/сек между системой управления и интеллектуальными первичными ДЧ. Он позволяет по двум проводам *осуществлять питание ДЧ, приём с него сигнала о параметре и производить настройку ДЧ* с помощью HART-модема.

В основе протокола - *принцип частотной модуляции* (ЧМ). Частотно-модулированный сигнал является двухполярным и при применении соответствующей фильтрации не влияет на основной аналоговый сигнал 4-20 мА.

Для передачи логической единицы HART использует один полный период (Т) частоты 1200 Гц ( $T \cong 0,8333$  мс), а для передачи логического "0" - два неполных периода 2200 Гц ( $T \cong 0,4545$  мс). ЧМ-составляющая накладывается на токовую петлю 4-20 мА. Поскольку среднее значение синусоиды за период равно нулю, то ЧМ-сигнал никак не влияет на этот аналоговый сигнал.

Стандартная *топология* - "звезда", но возможна и шинная организация, когда до 15 узлов подключены на одну витую пару.

Для передачи данных по сети используются два режима:

- 1) *асинхронный*: по схеме "Master-запрос/Slave-ответ" (один цикл укладывается в 500 мс);

2) *синхронный*: пассивные узлы непрерывно передают свои данные *Master*-узлу (время обновления данных в *Master*-узле за 250-300 мс).

За одну посылку один узел может передать другому до 4 технологических переменных, а каждое HART-устройство может иметь до 256 переменных, описывающих его состояние. Контроль корректности передаваемых данных основан на получении подтверждения.

**Приборы с HART-интерфейсом могут подключаться следующими способами:**

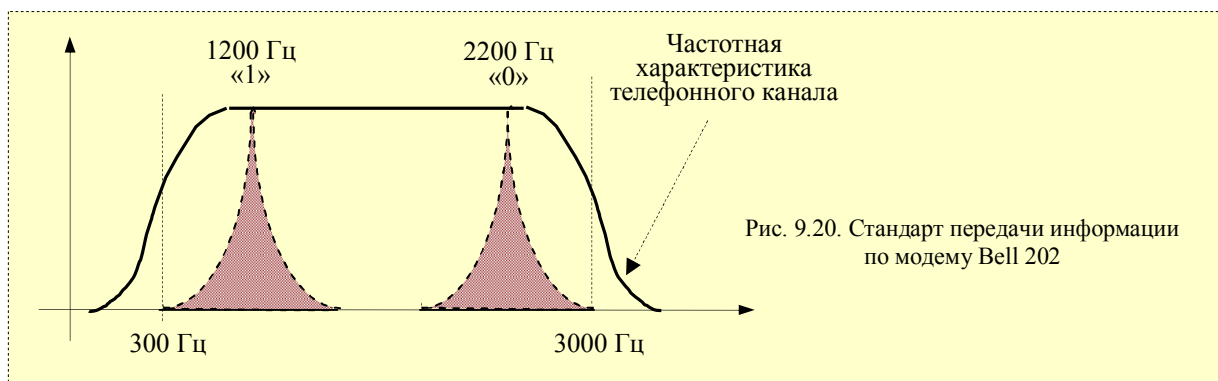
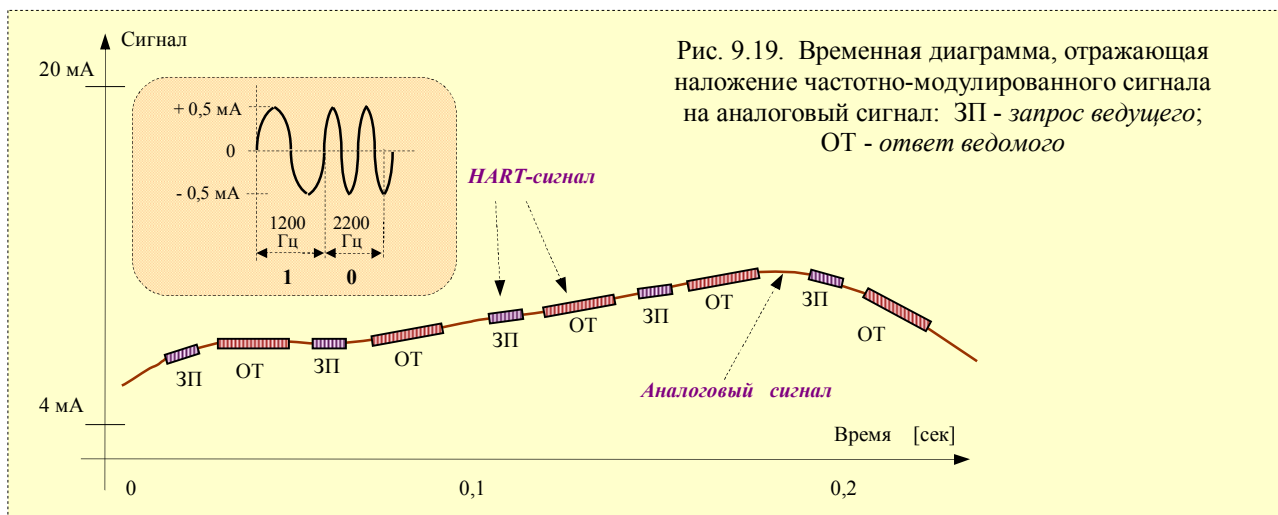
- через удаленное УСО SIMATIC ET200M с модулями HART;
- через HART-модем, с помощью которого устанавливается соединение «точка-точка» между компьютером и HART-устройством;
- через HART-мультиплексоры.

Одним из средств для подключения нескольких ведомых устройств в единую систему является *мультиплексор*, обеспечивающий доступ к ним через интерфейс RS-485, RS-232 и Ethernet.

Весь набор команд, реализованных в HART-протоколе, условно можно разделить на 3 группы: *Универсальные* – основные команды, поддерживаемые ведомыми устройствами. *Стандартные* (для групп устройств) – используемые практически во всех HART-устройствах команды. *Специфические* (зависящие от устройства) – команды настройки специфических, индивидуальных параметров какого-либо устройства.

В соответствии с HART-протоколом цифровой сигнал малой амплитуды ( $\pm 0.5$  мА) накладывается на аналоговый сигнал 4-20 мА (рис. 9.19). В соответствии со стандартом (Bell 202) цифровой сигнал преобразуется в две частоты - 1200 Гц и 2200 Гц, представляющие биты 1 и 0 (рис. 9.20).

Поскольку такой ЧМ-сигнал имеет нулевое среднее значение и фаза сигнала непрерывна, то на аналоговый сигнал 4-20 мА он не оказывает никакого влияния.



*Структура HART-протокола* - он реализует только уровни 1, 2 и 7 модели OSI (см. табл. 9.8). **Уровень 1 (физический)**. Канал связи работает по принципу частотной манипуляции с параметрами: - *скорость* передачи данных - 1200 бит/с;

- *частота* для логического "0", 2200 Гц; *частота* для "1" - 1200 Гц.

Большинство каналов связи подходит для этого вида цифровой передачи данных.

Уровень 2 (канальный). Так как HART-протокол реализован в соответствии с принципом «ведущий-ведомый», а это означает, что ведомое устройство передает информацию только по запросу ведущего устройства. Ведущее устройство передает конкретному ведомому устройству команду и возвращает ответ. Информация передается группами байт, разделённых на кадры. Разделение цифровой информации на кадры является спецификой HART-протокола (специальное ПО).

*Структура информационного байта имеет стандартный формат: 1 стартовый бит; 8 бит данных; 1 бит контроля по нечетности; 1 стоповый бит.*

Контроль корректности передаваемых данных основан на получении подтверждения. В многоточечном режиме в сообщении содержится информация о том, кто его передает и кто получает.

Уровень 7 (прикладной) - интерпретирует набор команд. Ведущее устройство посылает сообщения с запросами значений реальных данных и любых других параметров, имеющихся в устройстве. Ведомое интерпретирует эти команды в соответствии с HART-протоколом. Ответное сообщение передаёт ведущему устройству информацию о статусе и значениях параметров ведомого устройства.

Таблица 9.8. Сетевая модель OSI и HART-протокол

<i>Уровень</i>	<i>Функция</i>	<i>HART</i>
<i>Прикладной</i>	<i>Представление форматированных данных</i>	<i>HART-команды</i>
Представления	Преобразование данных	
Сеансовый	Осуществляет диалог	
Транспортный	Увеличивает надежность транспортного соединения	
Сетевой	Устанавливает сетевые соединения	
<i>Канальный</i>	<i>Устанавливает информационное взаимодействие</i>	<i>Правила HART-протокола</i>
<i>Физический</i>	<i>Соединение оборудования</i>	<i>Bell 202</i>

HART-протокол является промежуточным звеном при переходе от аналоговых устройств 4-20 мА к полностью цифровой технологии промышленных сетей (ЛПС-технологии).

*Основные преимущества HART-протокола:*

- по одной линии передается *одновременно аналоговая и цифровая информация* или, например, *питание и цифровая информация*;
- по цифровому каналу осуществляется *двунаправленная* передача;
- осуществляется взаимодействие ведомых устройств (ДЧ, ИМ и др.) друг с другом;
- гибкий формат сообщений позволяет адаптировать сеть к устройствам различного типа; и др.

В России датчики с HART-интерфейсом выпускает компания Метран.

*Резюме по ЛПС*

*Таким образом, можно отметить, что технологии ЛПС - это универсальные инструменты для построения интегрированных комплексов. При их выборе можно руководствоваться *количественными параметрами*: объем передаваемых полезных данных, максимальная длина линии, допустимое число узлов на линии, помехозащищенность и др.*

В общем случае, необходимо следовать принципу разумной достаточности и учитывать, что:

- заметна тенденция организации шлюзов из одного протокола в другой, *например: ASI - Profibus или Interbus-S - Profibus*;
- идет взаимопроникновение одних протоколов в другие;
- у всех имеется хорошо проработанная аппаратная и программная поддержка и т.д.

Но наиболее важным критерием выбора (ЛПС и ПТК) должно быть соответствие принципам открытых систем - *стандартизация и доступность*.

В табл. 9.9 приведены сравнительные характеристики некоторых ЛПС.

Таблица 9.9. Сравнительные характеристики промышленных сетей

Протокол, Стандарт	СПД	Число узлов	Скорость, Мбит/с	Длина линий, км	Топология сети	Доступ к сети
<b>Profibus</b> FMS/DP/PA	ВП, ВОК	До 126	0,5-1,5 (FMS); 1,5-12 (DP); 31 (PA)	1,2; 4,8 с повторителями; до 22 (ВОК)	Звезда, шина, кольцо	MASTER SLAVE
<b>Bitbus,</b>	ВП, РК, ВОК	28 (синхр. режим); до 250 (асинхр. режим)	0,5-2,4 (синхр. режим); 0,064-0,375 (асинхр. реж.)	0,03 (синхр режим); до 1,2 (асинхр. реж.)	Шина	MASTER SLAVE
<b>Ethernet</b>	ВП, КК, ВОК	1023	10, 100 (Fast Ethernet)	1,5 (КК); до 5 (ВОК)	Шина, звезда	МДКН/ОК
<b>ASI,</b>	Двухжильный кабель	До 32	До 167 кбит/с	До 1	Шина, звезда, дерево, кольцо	MASTER SLAVE
<b>HART,</b>	Пара проводников, Выдел. телеф. кабель	До 15	1,2 кбит/с	До 3	Точка-точка, шина, звезда	MASTER SLAVE
<b>LonWorks,</b>	ВП, КК, ВОК, РК	До 127	0,00488-1,25	До 2	Произвольная	МДКН/ОК
<b>Canbus,</b>	ВП	До 30	0, 05-1	До 1 (20 Кбод); до 40 м (1 Мбод)	Шина	МДКН/ОК
<b>Modbus,</b>	Не специфицирована	1 ведущий; до 247 ведомых	0,6-19,2 Кбод	15 м (RS232C), 1,2 км (RS422); 1 км (ток. петля)	Звезда, шина	MASTER SLAVE

ВП – витая пара; КК – коаксиальный кабель; ВОК – волоконно-оптический кабель; РК – радиоканал

