

## 2. СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ

Для передачи сообщений между абонентами ВС используется, в общем случае, совокупность *физических каналов связи (ФКС)*, последовательно соединенных между собой посредством различных устройств *коммутации и мультиплексирования*. ФКС обычно определяется как *фрагмент коммуникационной системы ВС, обеспечивающий обмен информацией между 2-мя соседними узлами ВС и не содержащий промежуточных устройств коммутации или мультиплексирования* [3]. ФКС известны в литературе также под названием *звеньев* (в англоязычной литературе – *links*) коммуникационной системы ВС [2, 7].

Основной функцией физического уровня модели OSI, как указано ранее, является обеспечение обмена потоками битов между 2-мя узлами ВС по ФКС. Данная функция сводится к реализации следующих базовых процедур:

- преобразованию кадра данных, подлежащего передаче между абонентами некоторого ФКС, в сигнал, пригодный для передачи по соответствующему ФКС;
- обратному преобразованию указанного сигнала в исходный кадр данных на приемной стороне.

При этом на физическом уровне данные, подлежащие передаче по ФКС, представляются как однородный поток битов, безотносительно к формату и смысловому назначению отдельных групп битов вышеназванного кадра. Их логическая интерпретация относится к канальному уровню, методы и средства реализации функций которого будут рассмотрены далее, в гл. 3.

Настоящая глава посвящается основам реализации функций физического уровня.

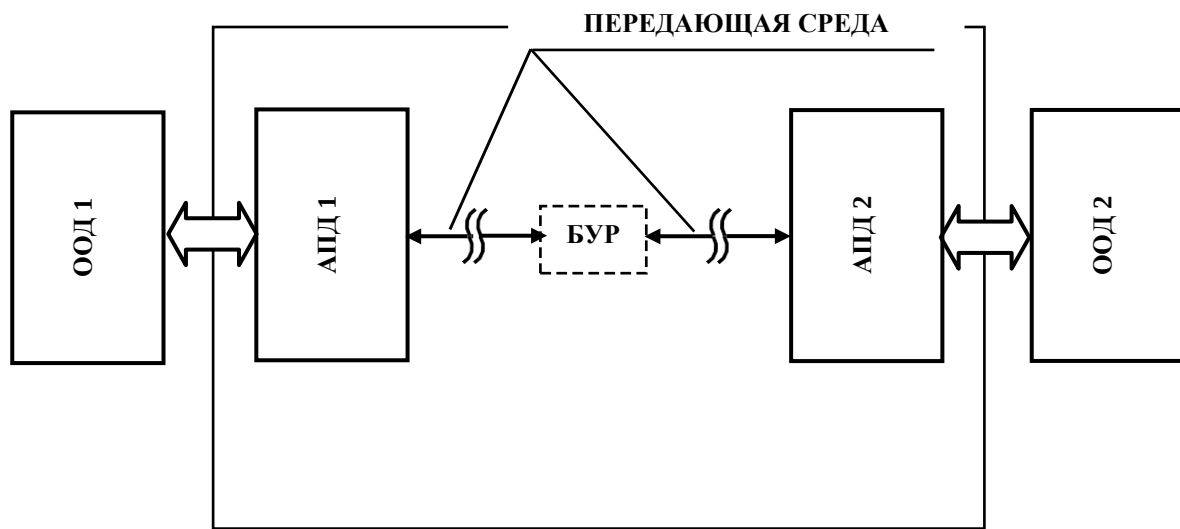
### 2.1. Общие сведения о ФКС ВС

#### 2.1.1. Обобщенная структурная схема ФКС

Базовая структурная схема ФКС представлена на рис. 2.1.

ФКС обеспечивает связь типа «точка-точка» между двумя единицами *оконечного оборудования данных (ООД)*, по-англ. – *Data*

*Terminal Equipment (DTE)*. К ООД относят устройства, вырабатывающие данные, подлежащие передаче по ФКС. В качестве ООД может выступать или абонентский компьютер, или некоторый узел коммуникационной системы ВС, например, коммутатор ЛВС, концентратор коммутируемой телефонной сети общего пользования (КТСОП) и т. п. Как правило, собственно ООД не включают в состав ФКС.



**Рис. 2.1.** Обобщенная структурная схема ФКС ВС:

ООД – оконечное оборудование данных; АПД – аппаратура передачи данных;  
БУР – блок усиления и регенерации

Для обмена данными между ООД служит *физическая среда передачи данных* (в дальнейшем, для краткости – *передающая среда*), в качестве которой может выступать провод или кабель различных типов, воздух или вакуум [1, 3, 7].

Связь ООД с передающей средой осуществляется посредством *аппаратуры передачи данных (АПД)*, в англоязычной литературе – *Data Communication Equipment (DCE)*. Основными функциями АПД являются:

- преобразование подлежащих передаче данных, поступающих с ООД, в сигнал, с одной стороны, несущий информацию о них, а с другой – пригодный для обмена данными по передающей среде соответствующего типа;
- преобразование сигнала-носителя, принимаемого из передающей среды, в данные, поступающие на ООД.

В качестве АПД могут выступать, например, *модуляторы / демодуляторы (модемы)* и/или *сетевые адаптеры* абонентских компьютеров, а также аналогичные им блоки коммутационного оборудования ВС. Необходимо отметить, что в настоящее время АПД часто не является отдельным конструктивным узлом, а входит в состав ООД [3].

*Блоки усиления и регенерации (БУР)* являются *промежуточной аппаратурой* ФКС. Они выполняют функции повышения мощности сигнала – носителя данных и восстановления его формы при искажениях, вносимых в процессе передачи сигнала. Их применение необходимо при протяженности ФКС больше некоторого значения, определяемого конкретным типом передающей среды, параметрами сигнала – носителя данных и некоторыми другими факторами [1, 3]. Например, при использовании кабеля на основе неэкранированной витой пары проводов [3] в качестве передающей среды, сигнале-носителе типа «Манчестер» (описанного далее, в подп. 2.5.5) и скорости обмена данными 10 Мбит/с максимальная длина кабеля, не требующая применения БУР, равна 100 м [3].

### **2.1.2. Сигналы-носители информации в ФКС**

В качестве данных сигналов выступают электрические напряжения, токи или электромагнитные волны различных частотных диапазонов, в зависимости от конкретного типа ФКС. Информацию о передаваемых данных несут изменения во времени состояния сигнала-носителя, которое характеризуется значениями одного или нескольких *информативных параметров* указанного сигнала (амплитуды, частоты, фазы и т. п.).

По числу состояний сигнала-носителя, распознаваемых приемником информации, различают две формы ее представления – *непрерывную* и *дискретную*. Непрерывная форма (называемая также *аналоговой*) предполагает применение теоретически бесконечного числа указанных состояний. На практике, однако, оно ограничено отношением  $\Delta X / \Delta x_{\min}$ , где  $\Delta X$  – допустимый диапазон изменения информативного параметра сигнала,  $\Delta x_{\min}$  – минимальная распознаваемая приемником разность между двумя его значениями, определяемая

техническими возможностями приемной аппаратуры, а также уровнем шумов и помех на линии связи. При *дискретной* форме представления данных, в свою очередь, применяется *конечное* число состояний сигнала-носителя, различаемых приемником информации. Распространенным частным случаем дискретной формы представления информации является применяемое в цифровой электронике *двоичное* представление данных с двумя распознаваемыми приемником состояниями сигнала-носителя данных, информативным параметром которого служит уровень напряжения или (реже) тока. В частности, цифровые КМОП-ИС воспринимают напряжения, находящиеся в диапазоне от 0 до  $(1/3) \times U_{пит}$  (где  $U_{пит}$  – напряжение питания) как уровень логического нуля, а в диапазоне от  $(2/3) \times U_{пит}$  до  $U_{пит}$  – как уровень логической единицы. Потенциальный вариант интерфейса RS-232C воспринимает как уровень нуля напряжения в диапазоне от 5 до 15 В, а единицы – от минус 5 до минус 15 В и т. п.

Благодаря ограниченному количеству различаемых состояний сигнала-носителя дискретных данных, диапазоны значений его информативных параметров, соответствующие каждому из указанных состояний, достаточно широки (см. выше) и, как правило, существенно превышают уровень шумов и помех на линии связи. Поэтому дискретная форма представления информации отличается значительно более высокой помехоустойчивостью, чем непрерывная. Кроме того, как было указано ранее, абонентами ВС являются компьютеры или (значительно реже) терминалы различного класса, представление и обработка данных в которых осуществляется исключительно в двоичной (т. е. дискретной) форме. С учетом этих двух факторов, представление и передача данных в ФКС ВС осуществляются только в дискретной форме, с использованием передаваемой абонентом двоичной (цифровой) последовательности в качестве исходной при формировании сигнала-носителя.

На первый взгляд, естественно было бы использовать два различаемых состояния сигнала-носителя ФКС, каждое из которых соответствует определенному значению («0» или «1») очередного бита исходной двоичной последовательности. Ряд протоколов передачи данных по ФКС ВС, преимущественно более ранней разработки, предполагает именно такой подход. Однако многие типы ФКС, например, линии связи ЛВС или высококачественные телефонные линии, обла-

дая относительно низким уровнем шумов и помех, допускают дискретное представление данных с числом различаемых состояний сигнала-носителя больше двух [1, 5]. При этом каждое из них соответствует определенному сочетанию битов передаваемой двоичной последовательности.

В подавляющем большинстве практических случаев в качестве носителей двоичных данных ФКС с двумя или более различаемыми состояниями выступает один из следующих типов сигналов [1, 5]:

- двухуровневый;
- многоуровневый;
- *модулированный* синусоидальный сигнал, представляющий собой синусоиду определенной частоты (*несущую*), значения одного из параметров которой (амплитуда, частота или фаза, в ряде случаев – амплитуда и фаза в совокупности) несут информацию о передаваемом сообщении.

Примеры временных диаграмм сигналов каждого из перечисленных типов представлены на рис. 2.2. Преобразование исходных двоичных данных в указанные сигналы осуществляется посредством АПД (см. рис. 2.1). Его принципы будут рассмотрены далее (пп. 2.5 и 2.6).

При этом, естественно, передача двоичных данных по ФКС посредством сигнала-носителя каждого из ранее перечисленных типов осуществляется *последовательно*, бит за битом (или группа битов за группой).

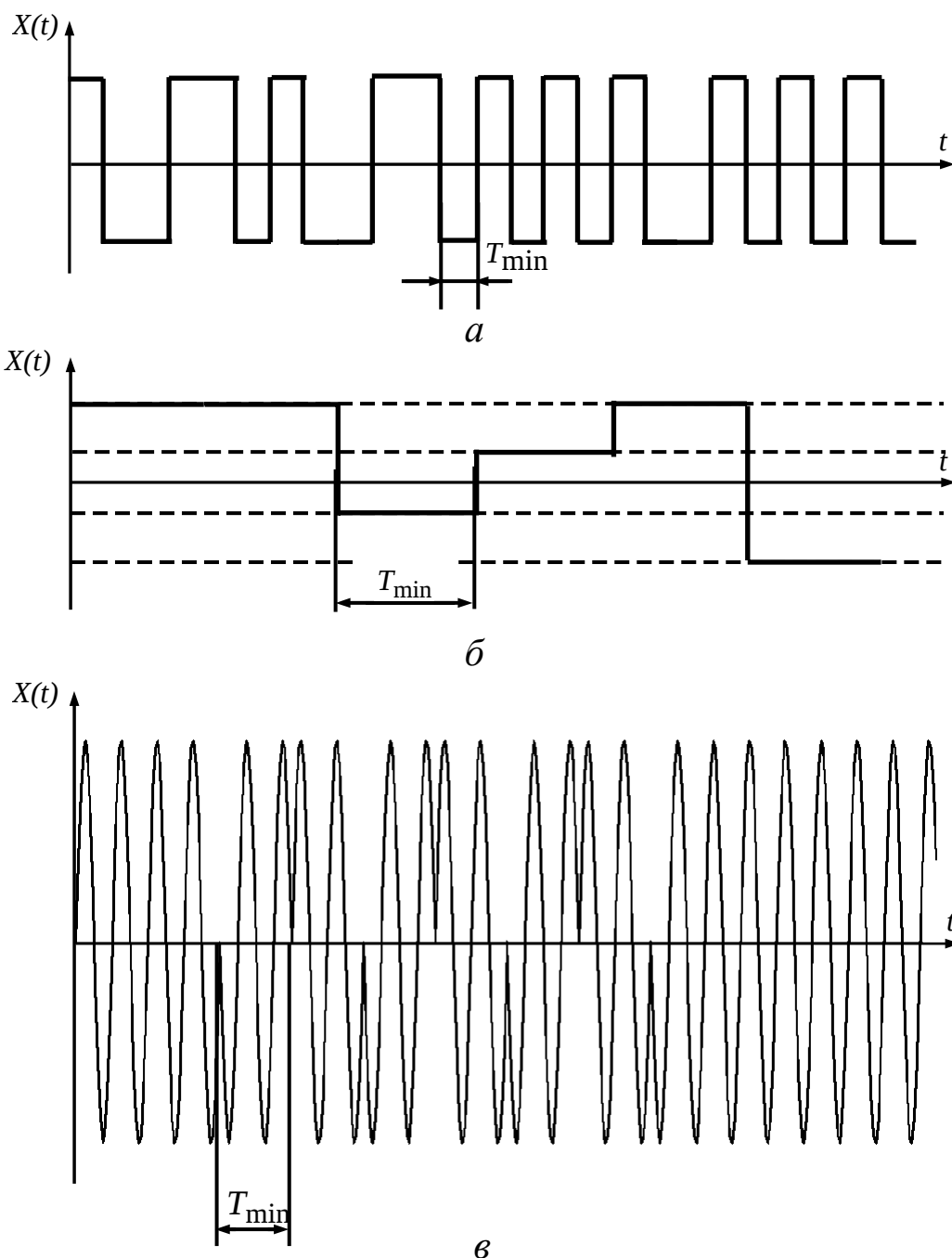
Необходимо отметить, что во многих практических случаях одна и та же ФКС может использоваться для передачи сигналов всех вышеназванных типов. Поэтому должны существовать *универсальные характеристики* сигналов, позволяющие определять параметры выходного сигнала ФКС при любом типе ее входного сигнала. Наиболее распространенной из таких характеристик является *спектральный состав (спектр)* сигнала, т. е. результат его представления в виде суммы некоторых *базисных функций*. Они определяются как набор функций, удовлетворяющих требованиям, в упрощенной форме выражаемых следующим образом [5]:

- сигнал любой формы может быть представлен в виде конечной или бесконечной суммы базисных функций;
- сигнал может быть однозначно восстановлен из данной суммы с любой заданной точностью.

До настоящего времени наиболее распространенными базисными функциями являются синусоидальные (гармонические) [5]. При этом спектральное представление сигнала имеет следующий вид:

$$X(t) = \sum_{i=0}^n A_i \times \sin(2\pi \times f_i \times t + \varphi_i), \quad (2.1)$$

где  $A_i$ ,  $f_i$ ,  $\varphi_i$  – соответственно амплитуда, частота и начальная фаза  $i$ -й синусоидальной компоненты (составляющей) сигнала, называемой также *спектральной компонентой*, *спектральной составляющей*, или *гармоникой*.



**Рис. 2.2.** Примеры временных диаграмм сигналов-носителей данных ФКС ВС: *а* – двухуровневого; *б* – четырехуровневого; *в* – синусоиды, модулированной по фазе

Дальнейшее изложение основ передачи данных по ФКС ВС будет основываться на представлении сигнала-носителя информации в гармоническом базисе, в соответствии с выражением (2.1).

Число  $n$  спектральных компонент теоретически бесконечно. Однако на практике спектральное представление сигнала всегда осуществляется *с некоторой заданной погрешностью*, отличной от нуля. При таком представлении в любом случае можно ограничиться некоторым конечным числом спектральных компонент [5].

Под собственно *спектром* сигнала обычно подразумевается зависимость  $A_i(f_i)$  (амплитудный спектр) и/или  $\varphi_i(f_i)$  (фазовый спектр) [5] (см. выражение (2.1)). На практике обычно более информативен амплитудный спектр [5]. Из его характеристик при передаче сигналов по каналам связи, в том числе по ФКС ВС, наиболее важное практическое значение имеют *граничные частоты амплитудного спектра сигнала*. Они определяются как границы диапазона частот, в котором находятся *значимые* спектральные составляющие сигнала. К ним относят компоненты с амплитудами, удовлетворяющими условию:

$$A_i/A_{\max} \geq \delta_{\min}, \quad (2.2)$$

где  $A_{\max}$  – максимальная из амплитуд спектральных компонент сигнала;

$\delta_{\min}$  – минимальное отношение амплитуды спектральной составляющей сигнала к  $A_{\max}$ , при котором она считается значимой [5] (т. е. ею нельзя пренебречь).

В различных практических приложениях передачи и обработки сигналов используются различные значения  $\delta_{\min}$ , в зависимости от требований к точности представления и восстановления сигнала, предъявляемых конкретным приложением. При передаче дискретных данных по линиям связи, в том числе по ФКС ВС, значение  $\delta_{\min}$  обычно принимается равным 0,1 или 0,3 [1, 5], в то время как, например, в информационно-измерительной технике оно может задаваться на уровне порядка нескольких тысячных и менее.

Распространенные разновидности сигналов-носителей двоичных данных в ФКС ВС (см. рис. 2.2), в общем случае (т. е. при равной вероятности всех возможных двоичных комбинаций исходных данных),

характеризуются следующими граничными частотами амплитудного спектра при  $\delta_{\min}$ , равном 0,3 [1, 5]:

- двух- и многоуровневый сигнал-носитель (см. рис. 2.2, а и 2.2, б):

$$\begin{aligned} f_{LS} &= 0; \leftrightarrow \\ f_{HS} &\approx 1/T_{\min}; \overleftarrow{\uparrow} \end{aligned} \quad (2.3)$$

- модулированный синусоидальный сигнал-носитель (см. рис. 2.2, в):

$$\begin{aligned} f_{LS} &\approx f_0 - (1/T_{\min}); \leftrightarrow \\ f_{HS} &\approx f_0 + (1/T_{\min}); \overleftarrow{\uparrow} \end{aligned} \quad (2.4)$$

где  $f_{LS}$  и  $f_{HS}$  – соответственно нижняя и верхняя граничная частота амплитудного спектра сигнала;

$T_{\min}$  – минимальная длительность интервала времени между изменениями информативных параметров сигнала-носителя (см. рис. 2.2);

$f_0$  – частота несущей.

Вследствие этого двух- и многоуровневые сигналы-носители в основном применяются в ФКС, полоса пропускания которых (подп. 2.1.3) включает в себя нулевую частоту или частоты, близкие к нулевой, например, в кабельных каналах связи ЛВС. Модулированные синусоидальные сигналы-носители, в свою очередь, применяются в ФКС, нижняя граничная частота полосы пропускания которых существенно отлична от нуля, например, в беспроводных ФКС (подп. 2.2.3).

### 2.1.3. Основные параметры и характеристики ФКС

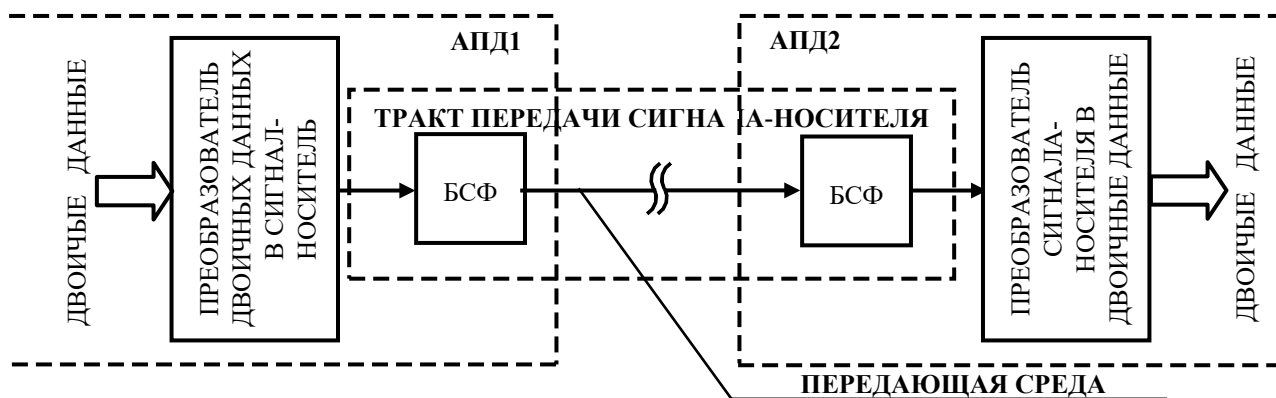
К базовым характеристикам ФКС в целом относятся [1, 3, 5]:

- полоса пропускания (*bandwidth*);
- пропускная способность (*throughput*);
- достоверность передачи данных (*bit error rate, BER*).

*Полоса пропускания ФКС на практике обычно определяется как диапазон частот, в пределах которого спад амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) тракта передачи сигнала-носителя данных ФКС не превышает некоторого заданного значения,  $\delta_{\max}$ .*

Под *трактом передачи сигнала-носителя данных* подразумевается участок ФКС от выхода преобразователя передаваемых двоичных данных в сигнал-носитель до входа преобразователя этого сигнала

в исходные двоичные данные. Указанные преобразователи, в свою очередь, обычно входят в состав АПД [1, 3, 5]. Обобщенная структурная схема указанного тракта (с источником и приемником сигнала-носителя) представлена на рис. 2.3. Необходимо отметить, что на практике связь между абонентами ФКС является двусторонней. Во избежание загромождения, на рис. 2.3 не показаны элементы тракта передачи данных от АПД2 к АПД1.



БСФ – блоки согласования и фильтрации

**Рис. 2.3.** Обобщенная структурная схема тракта передачи данных в ФКС ВС

АЧХ ФКС, обозначаемая символом  $|H(f)|$ , обычно определяется как зависимость от частоты следующего отношения:

$$|H(f)| = X_{mo}(f) / X_{mi}(f), \quad (2.5)$$

где  $X_{mi}(f)$  и  $X_{mo}(f)$  – амплитуда синусоидального сигнала частотой  $f$  соответственно на входе и на выходе тракта передачи сигнала-носителя (см. рис. 2.3) при некоторых заданных значениях выходного сопротивления БСФ передающего абонента и входного сопротивления БСФ абонента, принимающего данные [1, 5].

Из рис. 2.3 можно увидеть, что АЧХ ФКС и, соответственно, ее полоса пропускания определяются АЧХ (полосой пропускания) передающей среды, а также БСФ абонентских АПД. При этом необходимо отметить, что АЧХ передающей среды описывается выражением, несколько отличающимся от (2.5) (см. представленные далее определения параметров передающей среды ФКС).

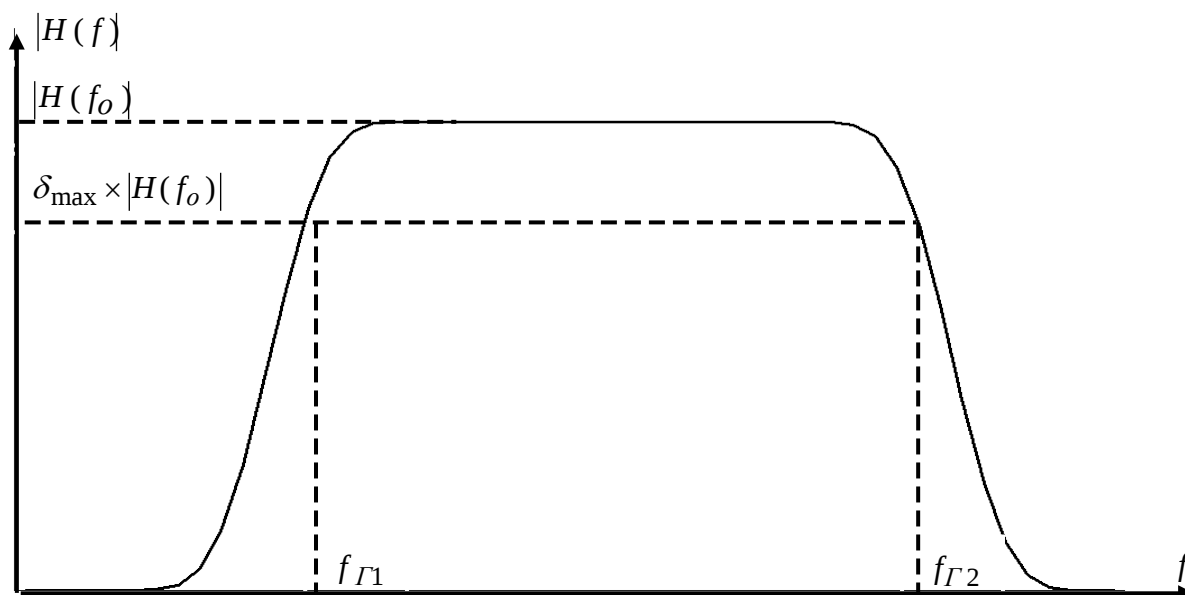
Спад АЧХ ФКС на некоторой частоте  $f$ , которую обозначим  $\delta(f)$ , определяется как отношение:

$$\delta(f) = \frac{|H(f_0)| - |H(f)|}{|H(f_0)|}, \quad (2.6)$$

где  $f_0$  – некоторая частота в пределах полосы пропускания ФКС, значение АЧХ на которой принимается за опорное. Если полоса пропускания включает в себя нулевую частоту, она выступает в качестве  $f_0$ . В противном случае,  $f_0$ , как правило, выбирается равной центральной частоте полосы пропускания [1, 5].

Значение максимального спада АЧХ ФКС  $\delta_{\max}$ , определяющего границы полосы пропускания, обычно задается равным 0,5 или 0,3 [1].

Смысл понятия полосы пропускания поясняет рис. 2.4.



$f_{Г1}, f_{Г2}$  – граничные частоты полосы пропускания

**Рис. 2.4.** Пояснение смысла понятия «полоса пропускания»

От ширины полосы пропускания ФКС зависит второй из перечисленных ранее базовых параметров ФКС – *пропускная способность*. Она определяется как *максимально возможная скорость передачи двоичных данных по ФКС, выражаемая в битах в секунду*.

Зависимость пропускной способности ФКС от ширины его полосы пропускания объясняется следующим. Как указано ранее, информация о передаваемых данных в ФКС ВС представляется состояниями

сигнала-носителя. Следовательно, чем выше скорость передачи данных, тем более высокая частота переключения состояний сигнала-носителя требуется для обеспечения соответствующей скорости и тем более широк частотный диапазон указанного сигнала [1, 5].

В наиболее общем виде связь между шириной полосы пропускания ФКС и ее пропускной способностью выражается *формулой Шеннона* [1, 3, 5], имеющей следующий вид:

$$C = \Delta f \times \log_2 \{1 + (P_C/P_{\text{ш}})\}, \quad (2.7)$$

где  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания ФКС;

$P_C$  и  $P_{\text{ш}}$  – соответственно мощность сигнала-носителя и шума на ФКС.

Выражение (2.7) предполагает, что число различаемых приемником состояний сигнала-носителя определяется отношением  $P_C/P_{\text{ш}}$  на линии. При  $P_{\text{ш}} = 0$  количество указанных состояний теоретически может быть бесконечным; бесконечна при этом и пропускная способность ФКС (что, однако, невозможно на практике).

Более удобной для практического применения является *формула Найквиста* [1, 3, 5]:

$$C = 2 \times \Delta f \times \log_2 N, \quad (2.8)$$

где  $N$  – число различаемых приемником состояний сигнала-носителя при используемом методе представления данных в передающей среде ФКС.

Согласно выражению (2.8), как и следует ожидать, пропускная способность ФКС прямо пропорциональна ширине ее полосы пропускания, а также числу битов, кодируемому каждым из различаемых состояний сигнала-носителя и равному  $\log_2 N$ .

Необходимо отметить, что выражения (2.7) и (2.8) определяют *максимально возможную* скорость передачи данных по ФКС при заданных ширине ее полосы пропускания и числе различаемых состояний сигнала-носителя или, соответственно, отношении «сигнал-шум». Реально достижимая скорость передачи всегда меньше максимально возможной и определяется, кроме вышеназванных параметров и характеристик ФКС, также типом сигнала-носителя и методом преобразования передаваемых двоичных данных в его информативные параметры. Связь между полосой пропускания ФКС и реально достижи-

мой скоростью передачи данных для распространенных методов указанного преобразования будет устанавливаться при конкретном рассмотрении каждого из них (пп. 2.5 и 2.6).

*Достоверность передачи данных* определяется как *вероятность искажения каждого из передаваемых по ФКС битов данных*. Этот параметр ФКС известен также под названием «*интенсивность битовых ошибок*», в англоязычной литературе – *Bit Error Rate (BER)*. BER, естественно, всегда меньше или равна единице, причем ее равенство некоторому значению  $p$  соответствует тому, что в среднем один бит из  $1/p$  искажается после передачи по ФКС. Значение BER зависит в основном от типа и параметров передающей среды ФКС (см. рис. 2.1), а также от применяемых методов защиты от ошибок на канальном уровне, например, помехоустойчивого кодирования передаваемых двоичных данных (подп. 2.7.4 и п. 3.8). При отсутствии такой защиты BER составляет, как правило,  $10^{-3} - 10^{-6}$ , а при использовании оптоволоконных линий связи в качестве передающей среды – порядка  $10^{-9}$  [3, 7]. При этом достоверность передачи данных, равная, например,  $10^{-4}$  соответствует искажению в среднем одного бита из 10 000 при их передаче по ФКС.

Кроме рассмотренных выше параметров ФКС в целом, важное практическое значение имеют *параметры и характеристики передающей среды ФКС*, основными из которых являются [1, 3, 7]:

- полоса пропускания (*bandwidth*);
- затухание (*attenuation*);
- помехоустойчивость;
- волновое сопротивление (для электрического кабеля).

*Полоса пропускания* передающей среды ФКС определяется аналогично полосе пропускания ФКС в целом (см. выше), за исключением того, что вместо АЧХ при этом используется коэффициент передачи по мощности, определяемый следующим образом [3]:

$$A_p(f) = P_o(f) / P_i(f), \quad (2.9)$$

где  $P_i(f)$  и  $P_o(f)$  – мощность синусоидального сигнала частотой  $f$  соответственно на входе и на выходе участка передающей среды определенной длины, а для электрического кабеля – также при заданных значениях выходного сопротивления источника сигнала и сопротивления нагрузки, обычно равных *волновому сопротивлению* кабеля (см. далее). Также следует отметить, что значение максимального

спада коэффициента передающей среды, определяющее границы полосы пропускания (см. рис. 2.4), как правило, задается равным 0,5 [3, 7].

Полоса пропускания электрического и волоконно-оптического кабеля определяется его типом, длиной и конструктивными параметрами (диаметром, шагом скрутки и т. п.) [3, 7]. Типовые значения ширины полосы пропускания для распространенных разновидностей кабеля будут представлены далее (п. 2.3). Полоса пропускания беспроводной передающей среды (например, радиоэфира) определяется длиной ее участка а также ее физико-химическими параметрами (температурой, влажностью и т. п.) [3, 7]. Для беспроводной передающей среды обычно нормируется не ширина полосы пропускания, а только *затухание* на определенных частотах и при заданных условиях [3, 7].

*Затухание* обычно определяется как *относительное уменьшение мощности синусоидального сигнала некоторой заданной частоты при его передаче по участку передающей среды определенной длины* [3]. Затухание электрического кабеля нормируется при выходном сопротивлении источника сигнала и входном сопротивлении приемника, равных волновому сопротивлению кабеля. Как правило, затухание выражается в *децибелах* в соответствии со следующим выражением:

$$A=10\times\lg\{P_o(f_T)/P_i(f_T)\}, \quad (2.10)$$

где  $P_i(f_T)$  и  $P_o(f_T)$  – мощность синусоидального сигнала с заданной («тестовой») частотой  $f_T$  соответственно на входе и на выходе участка передающей среды.

Например, уменьшение мощности в 10 раз соответствует затуханию, равному минус 10 дБ, в 30 раз – минус 14,8 дБ, в 100 раз – минус 20 дБ и т. д. Отсутствие ослабления сигнала в передающей среде (практически никогда не встречающееся) соответствовало бы затуханию, равному 0 дБ.

Затухание, по существу, является выраженным в децибелах значением  $A_p(f)$  отрезка передающей среды на определенной частоте. Как правило, затухание нормируется на нескольких «тестовых» частотах, что более удобно с технической и организационной точек зрения, чем нормирование  $A_p(f)$  в целом. На практике важно знать затухание на частоте *основной гармонике* сигнала-носителя, т. е. его спектральной компоненты с максимальной амплитудой.

Затухание определяется теми же факторами, что и полоса пропускания (см. выше). Типовые значения затухания для различных разновидностей передающей среды будут представлены далее (п. 2.3).

*Помехоустойчивость* передающей среды характеризует ее способность ослаблять влияние внешних электромагнитных наводок на передаваемый сигнал [3]. Очевидно, понятие помехоустойчивости имеет смысл только для кабеля. Беспроводная передающая среда практически не обладает устойчивостью к помехам, вследствие чего их подавление/устранение в беспроводных ФКС осуществляется исключительно посредством блоков согласования и фильтрации (см. рис. 2.1).

Основными *количественными характеристиками* помехоустойчивости являются [3]:

- перекрестные наводки на ближнем конце (*Near End Cross Talk, NEXT*);
- перекрестные наводки на дальнем конце (*Far End Cross Talk, FEXT*).

Смысл параметров NEXT и FEXT поясняет нижеприведенный рис. 2.5.

NEXT характеризует влияние выходного синусоидального сигнала передатчика, подключенного к одному из кабелей некоторого многокабельного ФКС, на вход приемника, подключенного к соседнему кабелю того же ФКС и находящегося в составе той же АПД, что и вышеуказанный передатчик. NEXT выражается в децибелах и определяется в соответствии со следующим выражением [3]:

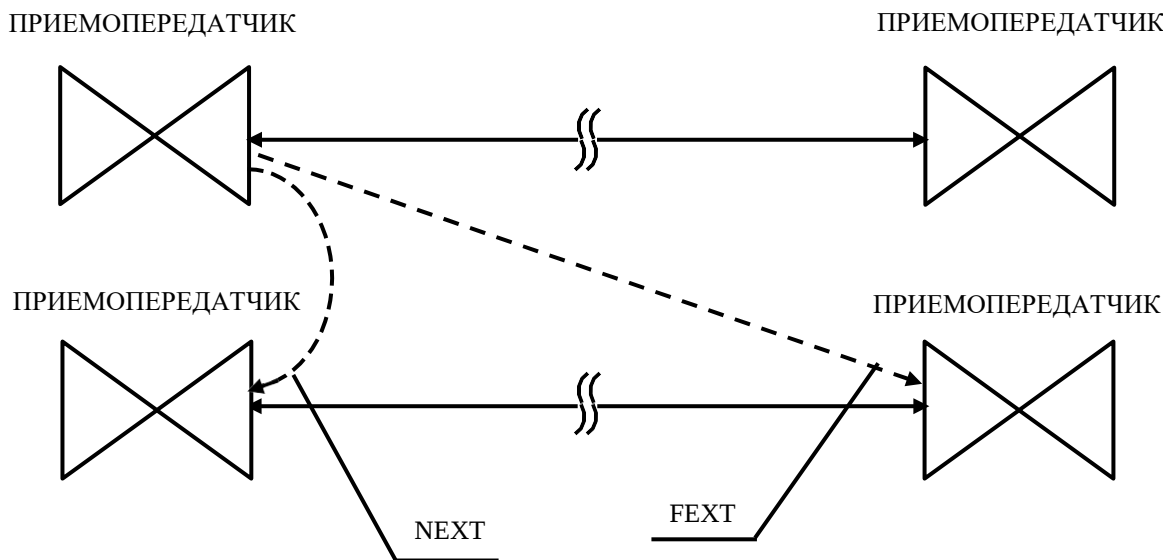
$$NEXT = 10 \times \lg \{ P_{IR}(f_T) / P_{OT}(f_T) \}, \quad (2.11)$$

где  $P_{OT}(f_T)$  и  $P_{IR}(f_T)$  – соответственно мощность синусоидального сигнала с «тестовой» частотой  $f_T$  на выходе передатчика и мощность вызванной им наводки на входе приемника соседнего кабеля.

FEXT, в отличие от NEXT, характеризует влияние выходного сигнала передатчика одного из кабелей многокабельного ФКС на вход приемника, подключенного к соседнему кабелю того же ФКС на стороне, *противоположной* передатчику (рис. 2.5). Выражение для расчета FEXT совпадает с (2.11), за исключением того, что в качестве  $P_{IR}(f_T)$  в нем выступает мощность сигнала на входе приемника противоположной стороны соседнего кабеля.

Необходимо отметить, что в ряде научно-технических источников (в т. ч. справочников) в выражении вида (2.11), определяющем NEXT и FEXT, вместо отношения  $P_{IR}(f_T) / P_{OT}(f_T)$  используется обратное

ему отношение, т. е.  $P_{OT}(f_T)/P_{IR}(f_T)$ . В любом из данных случаев абсолютное значение NEXT или FEXT, очевидно, одинаково; от того, какое из указанных отношений используется при определении параметра NEXT или FEXT, зависит только их знак. При использовании отношения  $P_{IR}(f_T)/P_{OT}(f_T)$  эти параметры отрицательны, а в противном случае – положительны.



**Рис. 2.5.** Пояснение смысла параметров NEXT и FEXT

На практике обычно нормируется только параметр NEXT. Влияние перекрестных наводок на дальнем конце, очевидно, заведомо меньше, чем на ближнем; поэтому параметр FEXT менее информативен, чем NEXT. Как правило, NEXT указывается для нескольких «тестовых» частот. Типовые значения NEXT для распространенных разновидностей кабелей будут представлены далее (п. 2.3).

Разновидностью параметров NEXT и FEXT являются *PS-NEXT* и *PS-FEXT* (где аббревиатура соответствует английскому словосочетанию *Power Sum*, наиболее корректный перевод которого – «суммарная наводка»). Более информативным параметром является PS-NEXT (см. вышеприведенные рассуждения для NEXT и FEXT), определяемый в соответствии со следующим выражением [3]:

$$PS - NEXT = 10 \times \lg \{ P_{\Sigma IR}(f_T) / P_{\Sigma OT}(f_T) \}, \quad (2.12)$$

где  $P_{\Sigma OT}(f_T)$  – суммарная мощность синусоидальных сигналов частотой  $f_T$  на выходах всех передатчиков многокабельной ФКС, входящих в состав одной из АПД;

$P_{\Sigma IR}(f_T)$  – суммарная мощность вызванной ими наводки на входе одного из приемников ФКС, входящих в состав той же АПД.

*Волновое сопротивление* как параметр передающей среды имеет смысл только для электрического кабеля. Оно определяется как отношение амплитуды волны напряжения к амплитуде волны тока при распространении электромагнитной волны вдоль кабеля и отсутствии ее отражения от нагрузки. Практический смысл волнового сопротивления заключается в следующем: для отсутствия искажений высокочастотных сигналов при их передаче по кабелю сопротивление его нагрузки и выходное сопротивление источника сигнала должны быть равны волновому сопротивлению кабеля. Данные условия известны под названием *условий согласования* кабеля. При этом под высокочастотным понимается сигнал, отношение длины волны значимых спектральных компонент которого (см. выражение (2.2)) к длине кабельной линии составляет 8 – 10 и менее [3]. Напомним, что длина электромагнитной волны равна отношению  $v/f$ , где  $f$  – частота,  $v$  – скорость распространения волны в соответствующей среде. Применительно к кабелю роль данной среды играет его изоляция, так как при распространении высокочастотных электромагнитных волн по кабелю они сосредотачиваются в основном в изоляции, а проводящие жилы кабеля лишь задают направление движения волн, благодаря чему они не рассеиваются, а распространяются вдоль линии [3]. Скорость распространения электромагнитной волны в среде с относительной диэлектрической проницаемостью равна  $3 \times 10^8 / \sqrt{\epsilon}$  м/с [3]. Например, даже для отрезка кабеля длиной 100 м высокочастотными и, следовательно, требующими соблюдения условий согласования, являются сигналы с длиной волны значимых спектральных компонент порядка 800 – 1000 м и меньше, т. е. с их частотой порядка 30 – 40 кГц и выше. Поэтому практически все ФКС ВС, использующие электрический кабель в качестве передающей среды, требуют соблюдения вышеуказанных условий согласования.

Волновое сопротивление кабеля определяется материалом его изоляции, а также конструктивными параметрами. Его типовые значения лежат в пределах от 50 до 150 Ом [3].

Обзор типовых значений вышеописанных параметров и характеристик, как распространенных типов ФКС в целом, так и их передающей среды, будет представлен в пп. 2.2 и 2.3.

#### **2.1.4. Классификация ФКС ВС**

В качестве основных критериев классификации ФКС обычно служат их назначение и тип передающей среды [1]. По данным критериям различают следующие основные типы ФКС ВС:

- кабельные ФКС КТСОП, используемые для обмена данными между абонентами ВС;
- кабельные ФКС, специально выделенные для обмена данными между узлами ВС, в том числе кабельные ФКС ЛВС;
- беспроводные ФКС общего пользования;
- выделенные беспроводные ФКС, в том числе беспроводные ФКС ЛВС.

Рассмотрим основные отличительные особенности вышеперечисленных типов ФКС.

### **2.2. Обзор основных типов ФКС ВС**

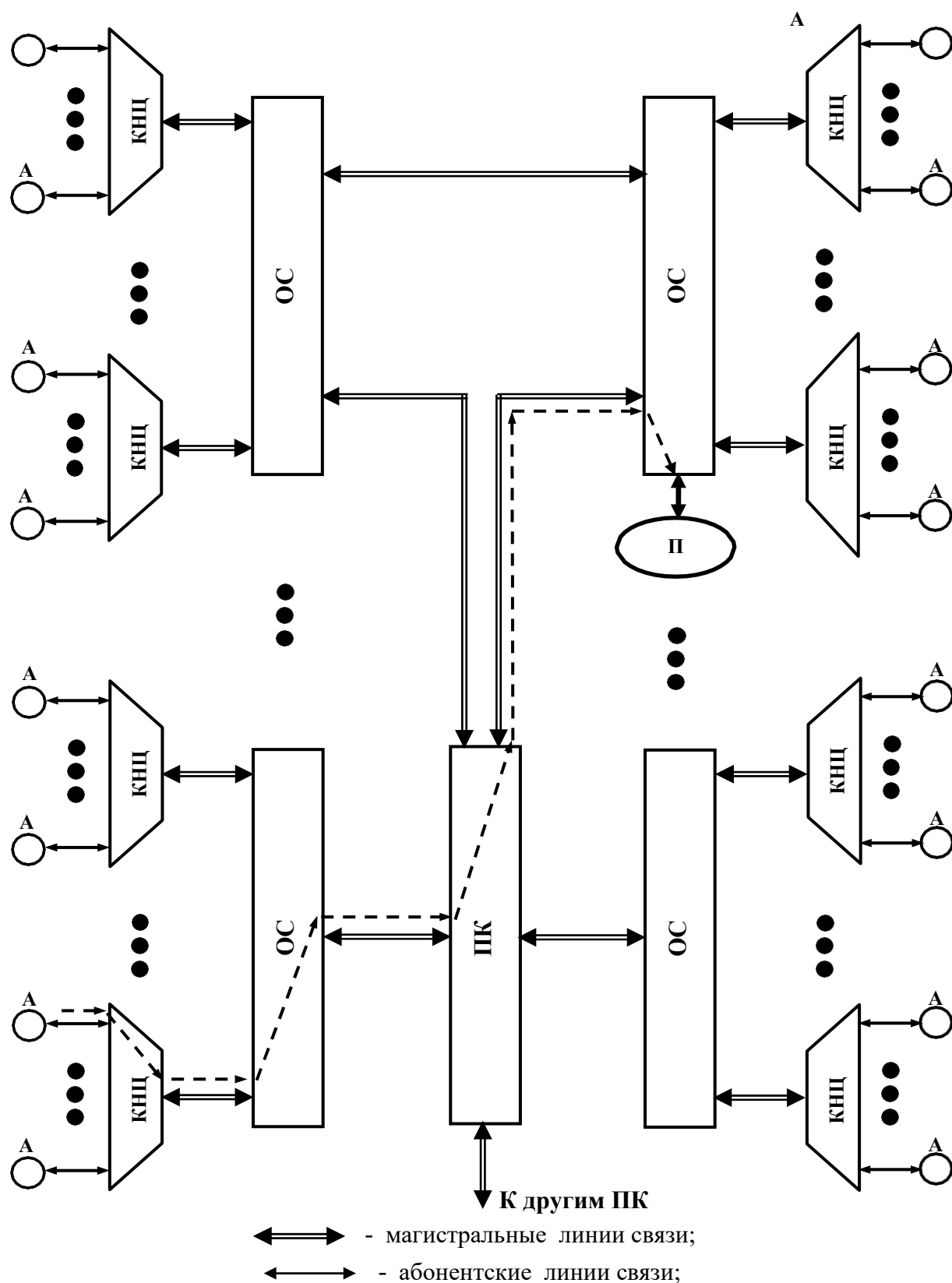
#### **2.2.1. Кабельные ФКС КТСОП**

Данный тип ФКС является наиболее давно применяемым для связи между абонентами ГВС. В самом деле, при достаточно больших расстояниях между ними и их значительном количестве (что имеет место в ГВС) для связи между абонентами экономически и организационно оправдано использовать уже существующие системы коммуникаций [3, 7]. К таковым, в первую очередь, относится КТСОП (по-англ. – *Public Switched Telephone Network, PSTN*), развивающаяся с начала прошлого века [3].

Обобщенная структурная схема фрагмента КТСОП представлена на рис. 2.6 [3, 7].

В целом, КТСОП состоит из следующих основных элементов:

- *абонентских линий связи (АЛС);*
- *магистральных линий связи (МЛС);*
- *коммутационного оборудования, основными типами которого являются концентраторы (называемые также подстанциями или оконечными телефонными станциями); опорные станции (ОС) и промежуточные коммутаторы (ПК), известные также под названием транзитных узлов.*



А – абоненты КТСОП; П – ЛВС провайдера; КНЦ – концентраторы;  
 ОС – опорные станции; ПК – промежуточные коммутаторы

**Рис. 2.6.** Обобщенная структурная схема фрагмента КТСОП

В качестве абонентского оборудования КТСОП, в общем случае, могут выступать телефонные аппараты, факсы, АПД абонентских компьютеров ВС, подключаемых к ней через КТСОП, а также коммутационное оборудование *сетевых провайдеров*. В современных КТСОП представление данных в аналоговой форме (наряду с цифровым) используется только в АЛС, причем в АЛС провайдеров применяется в основном цифровое представление данных.

Для МЛС характерен обмен данными исключительно в цифровой форме, с использованием сигналов-носителей, аналогичных применяемым в ФКС ВС (см. подп. 2.1.2 и рис. 2.2).

Практически, во всех МЛС современных КТСОП используется *уплотнение (мультиплексирование)* каналов связи, т. е. применение одной и той же МЛС для организации связи между множеством абонентов КТСОП. В МЛС КТСОП используется в основном *временное* уплотнение каналов (подпункт 2.8.4).

При этом существует *организационно-законодательное ограничение* на полосу пропускания каналов связи абонентских телефонных аппаратов и факсов с оконечными телефонными станциями (концентраторами) КТСОП: под каждый из таких каналов выделяется диапазон частот от 300 до 3400 Гц [3, 7]. Данное ограничение обусловлено не физическими возможностями трактов обмена данными между абонентами и концентраторами, а, в первую очередь, необходимостью *уплотнения* каналов связи между коммутационным оборудованием КТСОП (см. выше). Уплотнение каналов, в свою очередь, требует максимально возможного ограничения спектра информативных сигналов [1, 5]. Диапазон частот от 300 до 3400 Гц был выбран как минимально необходимый для приемлемого качества обмена речевыми сигналами между абонентами КТСОП (что изначально являлось ее основным назначением) [7].

Указанное ограничение распространяется и на ФКС, соединяющие абонентские компьютеры ВС с концентраторами КТСОП, если для обмена данными с другими узлами ВС, например, с провайдером, эти компьютеры используют коммутационное оборудование КТСОП, изначально предназначенное для связи между телефонными аппаратами / факсами. Однако это ограничение устраняется, например, при использовании технологий xDSL (см. далее).

Следует отметить, что данное ограничение не распространяется на ФКС, соединяющие провайдеров с коммутационным оборудованием КТСОП.

Абоненты КТСОП через АЛС подключаются к концентраторам (оконечным станциям) КТСОП, которые выполняют следующие основные функции:

- фильтрацию сигналов, передаваемых абонентами, т. е. ограничение их спектра частотами от 300 до 3400 Гц (см. выше);
- преобразование сигналов, полученных в результате фильтрации, в цифровые коды;
- *мультиплексирование* представленных в цифровой форме сообщений, передаваемых различными абонентами, т. е. их объединение в совокупность сообщений, поступающую в МЛС, которая соединяет концентратор с ОС;
- *демультиплексирование*, т. е. извлечение цифрового кода, предназначенного каждому из абонентов, из совокупности сообщений, поступающих с ОС по МЛС на концентратор;
- преобразование указанного кода в аналоговый сигнал, его фильтрация и передача абоненту по АЛС.

Необходимо отметить, что в отдельных случаях концентраторы могут располагаться непосредственно на ОС, если это возможно технически и организационно.

ОС и ПК существенно не различаются между собой принципами реализации и представляют многопортовые «интеллектуальные» цифровые коммутаторы, распределяющие сообщения (совокупности сообщений) между МЛС в соответствии с содержащейся в сообщениях адресной информацией о пунктах назначения. ОС совместно с ПК обеспечивают формирование *составных каналов связи* между абонентами КТСОП. Под составным каналом связи подразумевается тракт обмена данными между парой абонентов, состоящий из последовательно соединенных АЛС, МЛС и внутренних соединений в коммутаторах ОС и ПК. Пример такого тракта обозначен (см. рис. 2.6) пунктирной линией. При формировании составных каналов связи в современных КТСОП используются технологии как коммутации каналов, так и коммутации пакетов (см. рис. 1.2 и пояснения к нему).

Следует отметить, что ОС и ПК современных КТСОП, как правило, снабжаются средствами сопряжения с сетями мобильной связи (вкратце описанными далее, в подп. 2.2.3), что позволяет ее абонентам осуществлять соединение с абонентами КТСОП.

Как было сказано ранее, передача данных по МЛС современных КТСОП осуществляется исключительно в цифровой форме. Ши-

рина их полосы пропускания определяется, в первую очередь, *уровнем иерархии* МЛС, т. е. количеством абонентов, использующих ее для связи, и составляет от нескольких мегагерц до нескольких сотен мегагерц, при пропускной способности от единиц до сотен Мбит/с [3].

В целом, кабельные ФКС КТСОП реализуются в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 2.1, а их тракты передачи сигнала-носителя данных со структурной схемой, представленной на рис. 2.3.

ФКС КТСОП, используемые для обмена данными между абонентами ВС, можно, как и линии связи, разделить на *абонентские* и *служебные*.

В качестве ООД *абонентских* ФКС выступают подключаемые к ВС абонентские компьютеры или провайдерское оборудование с одной стороны, и концентраторы КТСОП – с другой. В качестве АПД служат модемы абонентских компьютеров или аналогичные им узлы и блоки коммуникационного оборудования сетевых провайдеров, с одной стороны, и блоки сопряжения концентраторов с АЛС (называемые *абонентскими комплектами*) – с другой. Роль передающей среды кабельных абонентских ФКС обычно выполняет электрический провод или кабель, а абонентских ФКС провайдеров – часто волоконно-оптический кабель. БУР в абонентских ФКС обычно отсутствуют. Ввиду существенно отличающейся от нуля нижней граничной частоты полосы пропускания абонентских ФКС КТСОП, кроме абонентских ФКС провайдеров, в качестве сигналов-носителей данных в них обычно используются не двух- и многоуровневые сигналы, нижняя граничная частота спектра которых равна нулю (см. подп. 2.1.2), а модулированные сигналы (п. 2.6). В абонентских ФКС провайдеров, ввиду отсутствия организационно-законодательных ограничений на их полосу пропускания, обычно применяются двух- и многоуровневые сигналы-носители [3].

Функции ООД *служебных* ФКС выполняют блоки сопряжения ОС и ПК с МЛС (см. рис. 2.6). В качестве передающей среды в них обычно используется волоконно-оптический кабель. При длине МЛС более нескольких километров, как правило, применяются промежуточные БУР. При использовании ВОК в качестве передающей среды служебных ФКС обычно применяются двухуровневые сигналы-носители данных.

Следует отметить, что из-за ограничения полосы пропускания абонентского ФКС КТСОП частотами от 300 до 3400 Гц (см. выше), предельно достижимая на практике скорость обмена данными между

абонентом ВС и провайдером по указанному ФКС обычно не превышает 56 000 бит/с [3] (подп. 2.6.5). Однако современный уровень развития сетевых технологий требует значительно более высоких скоростей, особенно при передаче данных от провайдера к абоненту. С другой стороны, указанное ограничение обусловлено организационно-законодательными, но не техническими факторами; в отсутствие этого ограничения ширина полосы пропускания абонентского ФКС составляет минимум несколько сотен килогерц, что позволяет достигнуть скоростей обмена минимум порядка нескольких сотен Кбит в секунду [7]. Поэтому в настоящее время достаточно широко распространены технологии обмена данными между абонентом КТСОП и провайдером, позволяющие устранить ограничения на скорость обмена, накладываемые полосой пропускания абонентского ФКС. Наиболее распространенными из них являются *технологии группы xDSL* [1, 3, 7].

Основой данного названия является аббревиатура английского словосочетания «Digital Subscriber Line», в переводе – «Цифровая абонентская линия». Индекс «х» различен для различных вариантов указанных технологий. В частности, известны такие их разновидности: *ADSL* (Asymmetric Digital Subscriber Line, в переводе – «Асимметричная цифровая абонентская линия»); *HDSL* (High bit-rate Digital Subscriber Line, в переводе – «Высокоскоростная цифровая абонентская линия»); *SDSL* (Single line Digital Subscriber Line, в дословном переводе – «Однолинейная цифровая абонентская линия») и некоторые другие [1, 7]. Общий принцип большинства технологий группы xDSL состоит в использовании АЛС КТСОП для связи как между абонентским телефонным аппаратом (ТА)/факсом и КТСОП, так и для высокоскоростного (порядка сотен Кбит – единиц Мбит в секунду) обмена данными между абонентским ПК и провайдером. Однако для решения двух указанных задач связи формируется два отдельных, независимых потока данных. Во избежание взаимного влияния двух указанных потоков, для их представления в АЛС применяется какой-либо из методов их *разделения (мультиплексирования)* (п. 2.8). Например, *технология ADSL*, достаточно широко применяемая для соединения физических лиц с ГВС Internet [7], использует *разделенные по частоте* сигналы-носители, спектры которых находятся в различных, не перекрывающихся между собой диапазонах частот. При этом для передачи по АЛС трафика между абонентским ТА/факсом

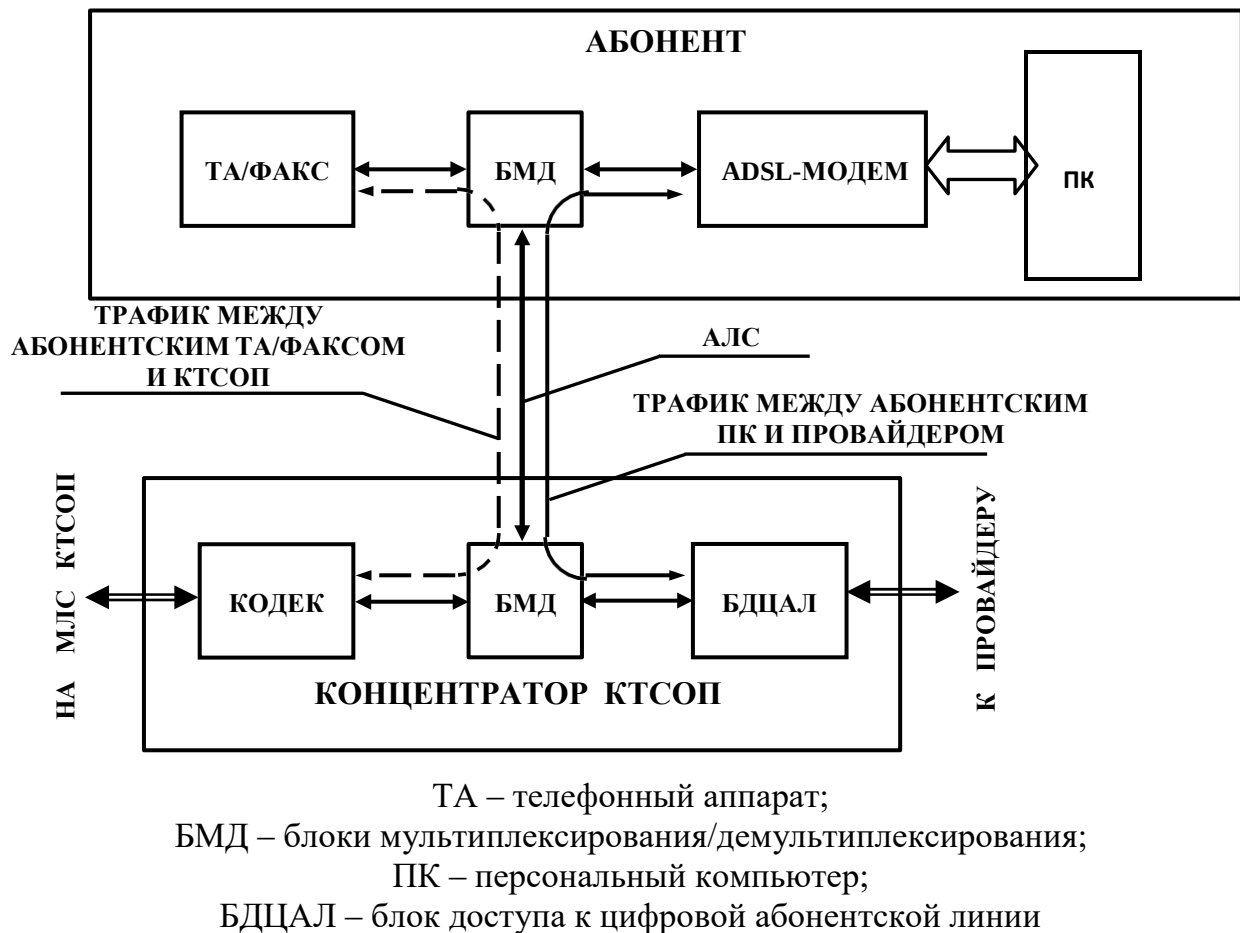
и КТСОП применяются сигналы, граничные частоты амплитудного спектра которых равны 300 и 3400 Гц соответственно. В свою очередь, для передачи по АЛС трафика между абонентским ПК и провайдером используются сигналы, спектр которых лежит в пределах от некоторой частоты  $f_{1DSL}$ , равной порядка нескольких десятков килogerц (т. е. существенно большей 3400 Гц) до частоты  $f_{2DSL}$ , приближенно равной физически достижимой верхней граничной частоте полосы пропускания конкретной АЛС. Указанная частота зависит в основном от типа кабеля АЛС и от расстояния между абонентом и концентратором КТСОП, и обычно составляет порядка нескольких сотен килogerц – единиц мегагерц [7]. В свою очередь, примерно 90 % частотного диапазона от  $f_{1DSL}$  до  $f_{2DSL}$  выделяется под сигналы-носители данных от провайдера к абоненту (т. е. под входящий трафик абонента, называемый по-английски *downstream*), а примерно 10 % указанного диапазона – под исходящий трафик абонента (*upstream*). При этом обеспечивается скорость передачи данных от провайдера к абоненту порядка сотен Кбит/с – единиц Мбит/с, а в обратном направлении – порядка десятков – сотен Кбит/с [7]. Большая ширина диапазона частот, выделяемого под входящий трафик абонента, чем под исходящий, обусловлена значительно меньшей интенсивностью последнего. В самом деле, на практике объем (в битах) запросов от абонента к провайдеру минимум на порядок меньше, чем объем данных, поступающих в ответ на эти запросы. Слово «Асимметричная» («Asymmetric») в названии ADSL-технологии обмена данными указывает именно на неодинаковую ширину диапазонов частот, выделяемых под входящий и исходящий трафики абонента.

Принцип ADSL-технологии поясняет рис. 2.7.

Носителем данных между абонентским ТА/факсом и КТСОП на участке от абонента до концентратора является аналоговый сигнал в частотном диапазоне от 300 до 3400 Гц (см. выше). Преобразование цифровых данных, поступающих с МЛС КТСОП, в указанный аналоговый сигнал, а также преобразование аналогового сигнала, поступающего с ТА/факса в последовательность цифровых отсчетов, передаваемую в МЛС, осуществляются посредством *кодека* (рис. 2.7) [7].

В качестве носителей данных между абонентским ПК и провайдером на участке от абонента до концентратора КТСОП обычно служат модулированные синусоидальные сигналы [1], формируемые посред-

ством БДЦАЛ и, соответственно, ADSL-модема (рис. 2.7). Эти же блоки осуществляют и обратное преобразование сигналов-носителей в цифровые данные. Методы модуляции, применяемые ADSL-технологией, вкратце будут рассмотрены в подп. 2.6.4.



**Рис. 2.7.** Пояснение принципа реализации технологии ADSL

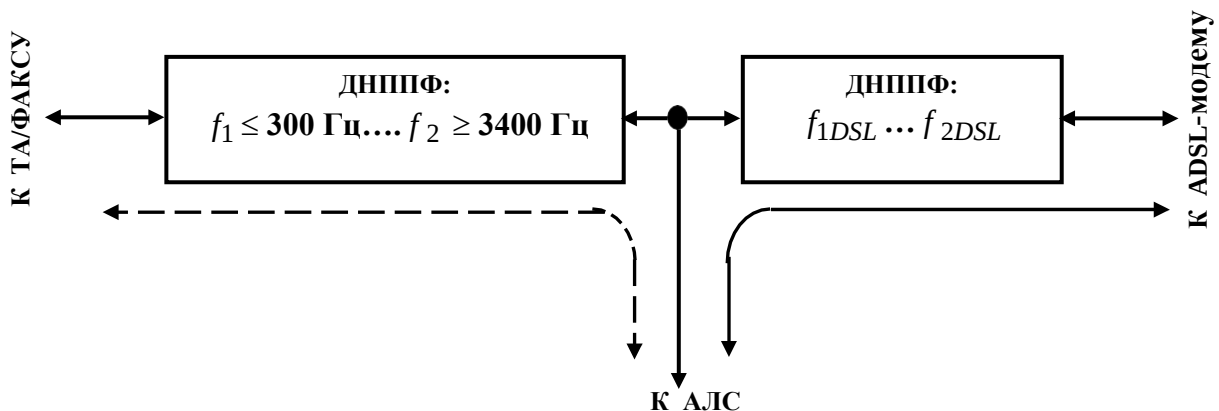
Упрощенная структурная схема БМД ADSL представлена на рис. 2.8. Мультиплексирование/демультиплексирование сигналов-носителей каждого из потоков данных как на стороне абонента, так и в концентраторе осуществляется посредством БМД (см. рис. 2.7), упрощенная структурная схема которого представлена на рис. 2.8. Он состоит из двух двунаправленных полосно-пропускающих фильтра (ДНППФ). Двунаправленными они названы потому, что осуществляют передачу сигнала (с фильтрацией) в обоих направлениях. Границы полосы пропускания каждого из ДНППФ указаны на рис. 2.8.

Интересно отметить, что xDSL-технологии, в отличие от связи с ВС через «традиционные» абонентские ФКС КТСОП, позволяют

в одно и то же время как пользоваться ТА/факсом, так и осуществлять обмен данными между абонентским ПК и провайдером.

Необходимо отметить, что, кроме кабельных АЛС и МЛС КТСОП, достаточно широко применяются *беспроводные* АЛС, известные под названием *беспроводных абонентских окончаний*, а также *беспроводные* МЛС. Краткий обзор принципов их реализации представлен в подп. 2.2.3.

До недавнего времени АЛС КТСОП широко применялись для подключения абонентов к ГВС, а также к сетям мегаполисов, в некоторых практических случаях – и ЛВС [3, 7]. В настоящее время для этого все шире используются выделенные (преимущественно волоконно-оптические) или беспроводные линии связи. Однако применение АЛС КТСОП для подключения к ГВС (в основном, с использованием xDSL-технологий) все еще достаточно распространено, особенно в относительно некрупных городах.



ДНППФ – двунаправленные полосно-пропускающие фильтры

**Рис. 2.8.** Упрощенная структурная схема БМД ADSL

МЛС КТСОП (как кабельные, так и беспроводные) относительно широко используются в качестве магистральных линий связи ГВС, а в ряде случаев – и ВС других классов.