Раздел II

КАНАЛООБРАЗОВАНИЕ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

Глава 4

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

4.1. Обобщенная схема многоканальной системы передачи

Многоканальная система передачи (МСП) представляет собой сложный комплекс, включающий станционные и линейные устройства и обеспечивающий получение определенного числа типовых каналов передачи на заданную дальность.

В общем виде МСП можно представить структурной схемой, приведенной на рис. 4.1 для одного направления передачи. В обратном направлении – аналогичная схема. Первичные сигналы связи $C_i(t)$ от n независимых источников поступают на n входов системы передачи. Как правило, эти сигналы не имеют признаков, по которым их можно было бы разделить на приемном конце. Поэтому они подвергаются некоторому преобразованию в преобразователях Π_i тракта передачи таким образом, что каждому сигналу придается некоторый различительный параметр $\lambda_i\,(\lambda = \overline{1,n})$, позволяющий производить их разделение. Таким образом, первичные информационные сигналы $C_i(t)$ преобразуются в так называемые канальные сигналы $S_i(t,\lambda_i)$. Далее канальные сигналы объединяются в устройстве объединения УО в единый групповой сигнал S_Σ, кото-

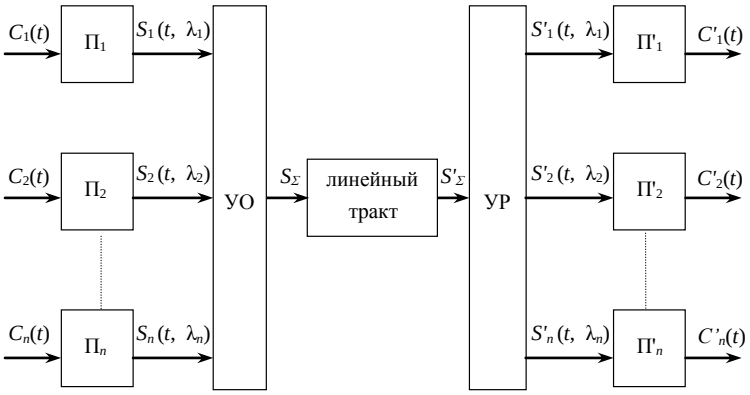

Рис. 4.1

рый передается по линейному тракту системы передачи.

Под линейным трактом понимают совокупность технических средств, обеспечивающих передачу групповых сигналов электросвязи на необходимую дальность.

На приемном конце групповой сигнал S'_{Σ} разделяется в устройстве разделения УР на *n* канальных сигналов $S_i(t,\lambda)$ с использованием разделительных параметров λ_i. В преобразователях Π'_i канальные сигналы преобразуются в исходные первичные информационные сигналы $C'_i(t)$ путем исключения разделительных параметров λ_i. Вид разделительного параметра определяет метод разделения каналов.

Полученные на приеме первичные информационные сигналы $C'_i(t)$, так же как и групповой сигнал S'_{Σ} канальные сигналы $S'_i(t,\lambda_i)$ несколько отличаются от соответствующих переданных сигналов $C_i(t)$, S_{Σ} и $S_i(t,\lambda)$ за счет искажений и помех, полученных при преобразованиях (вследствие несовершенства этих устройств) и при передаче по линейному тракту. Различия в сигналах оцениваются функцией ошибки $\xi(t)=\left|C'_i(t)-C_i(t)\right|$.

Проектировщики стремятся обеспечить, чтобы эти различия не превосходили некоторых допустимых значений, при которых выполняются нормы на параметры каналов передачи и обеспечивается требуемое качество связи.

4.2. Линейные и нелинейные методы разделения каналов

Принципы построения многоканальных систем передачи, ее параметры и параметры образуемых каналов передачи определяются методами разделения каналов, которые можно подразделить на линейные и нелинейные.

К *линейным* относятся методы, при которых разделение сигналов отдельных каналов производится линейными устройствами. В этом случае групповой сигнал является линейной функцией вида

$$S_{\Sigma}(t)=\sum_{i=1}^{n} S_i(t,\lambda_i) \tag{4.1}$$

Для линейного разделения каналов должна быть обеспечена линейная независимость канальных сигналов, то есть ни один из них не должен представляться комбинацией других канальных сигналов. Такое требование выполняется, если канальные сигналы описываются ортогональными функциями, то есть на некотором интервале $0 < t < T$ они должны соответствовать условиям ортогональности

$$\int_0^T S_i(t,\lambda_i)S_k(t,\lambda_k)\mathrm{d}t=\begin{cases}0 & \text{при } i\neq k\\ \text{const}\neq 0 & \text{при } i=k\end{cases} \tag{4.2}$$

Этим условиям удовлетворяют: любые функции, имеющие неперекрывающиеся между собой частотные спектры; последовательность неперекрывающ-

ихся во времени импульсов; ортогональные системы тригонометрических функций, функций Уолша, полиномы Лежандра, Чебышева и др.

Нелинейные методы разделения каналов используют для разделения сигналов нелинейные устройства. Эти методы применимы для объединения-разделения цифровых (импульсных) первичных сигналов электросвязи.

Из нелинейных методов рассмотрим применяемые на практике комбинационный метод и метод разделения сигналов по уровню.

Сущность *комбинационного метода* состоит в том, что *n* сигналов от *n* независимых источников заменяются одним сигналом, однозначно связанным с комбинацией исходных сигналов. Обычно исходные сигналы – это некоторая комбинация “нулей” и “единиц”. На входе устройства объединения в каждый момент времени будет случайная комбинация “0” и “1”. В устройстве объединения эта комбинация ставится в однозначное соответствие с другой комбинацией “0” и “1”, которая является групповым сигналом и передается по линейному тракту. На приемном конце из группового сигнала восстанавливается комбинация “0” и “1”, аналогичная той, которая была на входе и производится разделение символов по отдельным каналам.

Таким образом, в отличие от линейных методов объединения-разделения сигналов, когда групповой сигнал представляет собой сумму канальных сигналов, при комбинационном методе групповой сигнал является некоторым закодированным числом, отображающим комбинацию канальных сигналов.

В методе разделения по уровню различительным признаком является уровень (напряжение) сигналов, при этом канальные сигналы могут иметь одинаковую форму и перекрываться во времени. Общий групповой сигнал является суммой канальных сигналов, но разделить их можно только нелинейными устройствами.

Для примера рассмотрим объединение-разделение двух сигналов, каждый из которых представляет собой комбинацию прямоугольных импульсов с амплитудами U_1 и U_2. Временные диаграммы канальных сигналов и суммарного группового сигнала $U = U_1 + U_2$ показаны на рис. 4.2, а. Чтобы разделить групповой сигнал на исходные, на приемной стороне используется (рис. 4.2, б) пороговое устройство ПУ с порогом $U_n = (U_1 + U_2)/2,$ которое выделяет с точностью до постоянного множителя сигнал U_1. Второй сигнал U_2 получается в результате вычитания из группового сигнала *U* выделенного сигнала $U_{1.}$ Усилитель корректор УС КОР нормализует амплитуды выделенного сигнала U_1. Современные многоканальные системы передачи в подавляющем большинстве используют для каналообразования два линейных метода – частотное разделение каналов в аналоговых системах передачи и временное разделение каналов в цифровых системах передачи. Совместно с ними используется также метод уравновешенного моста. Рассмотрим эти методы подробнее.

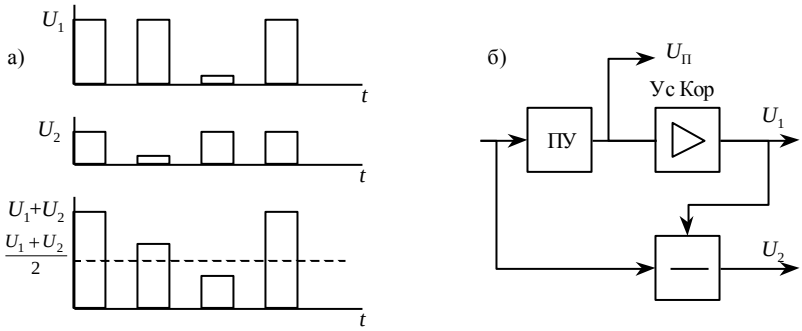

Рис. 4.2

4.3. Метод уравновешенного моста

Наряду с частотным и временным методами каналообразования в практике применения проводных линий связи широко используется метод уравновешенного моста для образования дополнительных каналов телеграфной и телефонной связи или каналов передачи сигналов телеконтроля, токов дистанционного питания необслуживаемых усилителей и т.п. Уравновешенный мост строится с помощью дифференциальных трансформаторов (ДТ).

На рис. 4.3 показано образование на двухпроводной цепи телефонного и телеграфного каналов электросвязи. Уравновешенный мост будет при условии равенства сопротивлений проводов а и б и сопротивлений полуобмоток трансформаторов (средняя точка (ср.т.) делит линейную обмотку трансформатора точно пополам). В этом случае телефонные сигналы не будут влиять на телеграфные (в средних точках будет нулевой потенциал), а телеграфные сигналы не будут мешать телефонной связи (телеграфные токи в обеих половинах обмотки одинаковы и противоположны по направлению, и во вторичных обмотках токи отсутствуют). Обратным проводом для телеграфной цепи является земля.

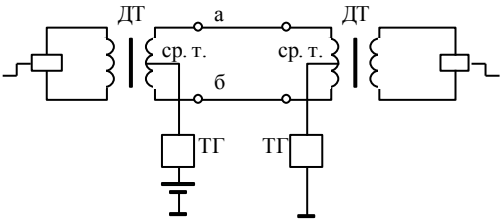

Рис. 4.3

Аналогичная система используется на линиях многоканальной связи для передачи дистанционного электропитания (ДП) необслуживаемых усилительных пунктов (НУП) от обслуживаемых (ОУП) (рис. 4.4).

На многопарных кабельных

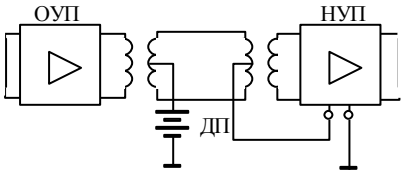

Рис. 4.4

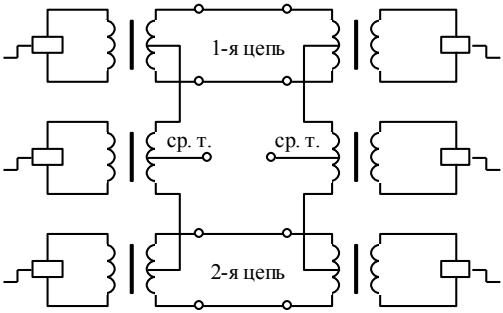

Рис. 4.5

линиях с помощью дифференциальных трансформаторов можно организовать искусственные (фантомные) цепи. На рис. 4.5 показано как на двух физических двухпроводных цепях образована искусственная цепь, и на ней получена дополнительная телефонная связь. По средней точке искусственной цепи (ср.т) можно организовать телеграфную связь. На линиях симметричного кабеля физические цепи используются для обра-зования линейных трактов противоположных направлений передачи, по искусственной цепи организуется служебная телефонная связь, а по средней точке – передача дистанционного электропитания НУП.

4.4. Системы передачи с частотным разделением каналов

Принцип частотного разделения каналов показан на упрощенной структурной схеме системы передачи с ЧРК (рис. 4.6), которая конкретизирует обобщенную схему рис. 4.1. Признаками отличия канальных сигналов являются разные и неперекрывающиеся полосы частот, занимаемые этими сигналами в групповом спектре. Такое различие позволяет разделить канальные сигналы в приемной части аппаратуры с помощью электрических фильтров.

В передающей части системы передачи первичные информационные сигналы $C_i(t)$ преобразуются с помощью модуляторов M_i и несущих частот f_i в несовпадающие друг с другом полосы частот канальных сигналов $S_i\,(t, f_i)$, что показано на рис. 4.7. Полученный в устройстве обьединения УО групповой сигнал $S_\Sigma\,(t, f)$ передается по линейному тракту. В приемной части системы передачи канальные сигналы разделяются полосовыми фильтрами Φ_i устройства разделения УР. Каждый фильтр пропускает канальный сигнал только своего диапазона частот и подавляет все остальные сигналы. Выделенные полосовыми фильтрами канальные сигналы поступают на преобразователи частоты (демоду-

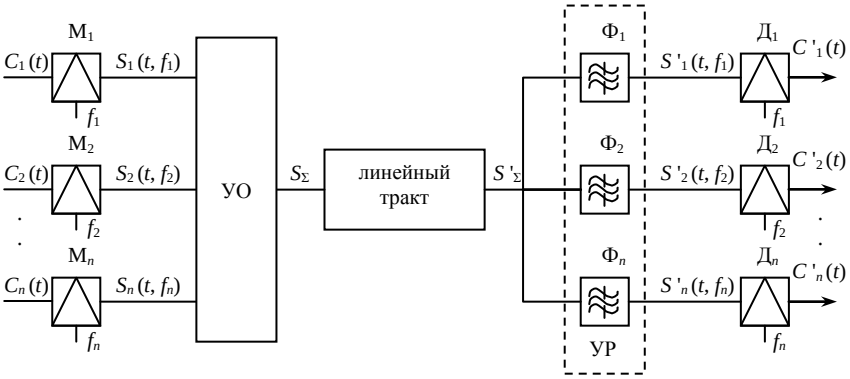

Рис. 4.6

ляторы $Д_i$), которые с помощью аналогичных несущих частот f_i преобразуют канальные сигналы $S_i'(t, f_i)$ в первичные информационные сигналы $C_i'(t)$. Эти сигналы в общем могут несколько отличаться от переданных из-за искажений и помех в тракте передачи.

В принципе, в рассматриваемой СП с ЧРК возможно полное разделение сигналов, если преобразователи частоты и фильтры имеют идеальные характеристики, линейный тракт является идеально линейным устройством (четырехполюсником), а канальные сигналы – ортогональные функции. Обозначим спектральные плотности амплитуд канальных сигналов через $S_i(\omega)$, тогда в соответствии с рис. 4.7

$$
\begin{aligned}
S_1(\omega) &= \begin{cases} a_1 \text{ при } \omega_1' < \omega < \omega_1'' \\ 0 \text{ при } \omega < \omega_1',\ \omega > \omega_1'' \end{cases} \\
S_2(\omega) &= \begin{cases} a_2 \text{ при } \omega_2' < \omega < \omega_2'' \\ 0 \text{ при } \omega < \omega_2',\ \omega > \omega_2'' \end{cases} \\
&\ldots \\
S_n(\omega) &= \begin{cases} a_n \text{ при } \omega_n' < \omega < \omega_n'' \\ 0 \text{ при } \omega < \omega_n',\ \omega > \omega_n'' \end{cases}
\end{aligned}
\tag{4.3}
$$

где a_i – некоторые конечные величины.

Используя приведенные неравенства, покажем, что канальные сигналы ортогональны, то есть выполняются условия (4.2)

$$
\int_{\omega_i'}^{\omega_n''} S_i(\omega) S_k(\omega) \mathrm{d}\omega = \begin{cases} a_i \text{ при } i = k \\ 0 \text{ при } i \neq k \end{cases}
\tag{4.4}
$$

Разобьем приведенный интеграл на сумму интегралов

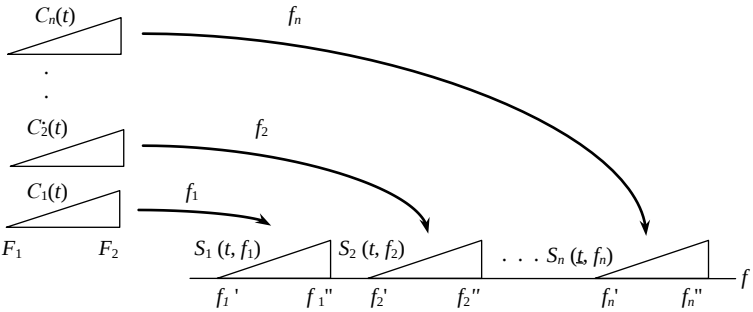

Рис. 4.7

$$\int_{\omega_1'}^{\omega_n''} S_i(\omega)S_k(\omega)\mathrm{d}\omega = \int_{\omega_1'}^{\omega_1''} S_i(\omega)S_k(\omega)\mathrm{d}\omega + \int_{\omega_2'}^{\omega_2''} S_i(\omega)S_k(\omega)\mathrm{d}\omega + \ldots + \int_{\omega_n'}^{\omega_n''} S_i(\omega)S_k(\omega)\mathrm{d}\omega$$

В этом выражении при $i = k$ только одно слагаемое не равно нулю, а все остальные равны нулю в соответствии с неравенством (4.3) – в подын-тегральных выражениях по крайней мере один из сомножителей равен нулю.

$$\int_{\omega_i'}^{\omega_i''} S_i(\omega)S_k(\omega)\mathrm{d}\omega = a_i \neq 0 \text{ при } i = k \qquad (4.5)$$

Однако реально условия (4.3) полностью не выполняются, и фильтры Φ_i пропускают не только сигналы своего канала, но и частично неподавленные сигналы других каналов, значит между каналами будут взаимные влияния. При разработке систем передачи принимаются различные меры, позволяющие свести эти влияния к требуемому минимуму. В частности, для облегчения требований к полосовым фильтрам применяют такие режимы модуляторов, которые позволяют уменьшить количество и амплитуды побочных колебаний, а между полосами частот канальных сигналов предусматривают защитные промежутки. Кроме того, при проектировании линейных трактов обеспечивается достаточно высокая их линейность.

Исходя из схемы рис. 4.6 можно обозначить основное оборудование многоканальной аналоговой системы передачи (АСП) или системы передачи с ЧРК, что показано на рис. 4.8. Каналообразующая аппаратура (КОА) является унифицированной и предназначена для формирования типовых каналов передачи и групповых трактов с определенными электрическими параметрами. Аппаратура линейного тракта – часть системы передачи, обеспечивающая передачу группового сигнала $S_\Sigma(t, f)$, согласованного по характеристикам с линией передачи (направляющей системой). Аппаратура линейного тракта включает в себя устройства, устанавливаемые на оконечных пунктах (ОП) – оконечную аппаратуру линейного тракта (ОАЛТ), линию передачи и аппаратуру промежуточных

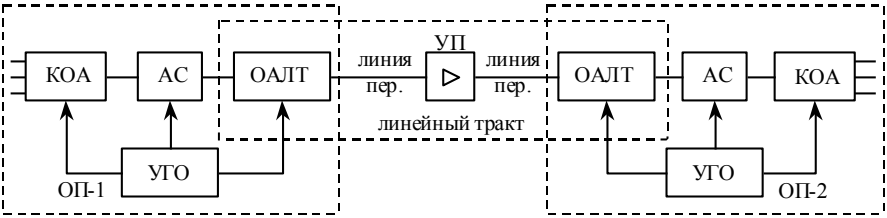

Рис. 4.8

усилительных пунктов (УП). Для согласования характеристик группового многоканального сигнала, полученного от КОА, в тракт включена аппаратура сопряжения АС, на выходе которой будет так называемый линейный сигнал или линейный спектр частот, пригодный для передачи по конкретному типу линейного тракта – проводного (различных типов линий), радиорелейного или спутникового. На противоположном оконечном пункте (ОП-2) в АС производится обратное преобразование.

Следует иметь в виду, что на рис. 4.8 показано одно направление передачи. В обратном направлении должно быть аналогичное оборудование. Общим для обоих направлений является унифицированное генераторное оборудование (УГО), которое обеспечивает аппаратуру оконечных пунктов необходимыми для работы номиналами электрических колебаний. На схеме не показаны также нужные для работы многоканальной системы передачи источники электропитания и другие вспомогательные устройства, которые будут рассмотрены в следующих главах учебника.

4.5. Системы передачи с временным разделением каналов

Отличительным признаком канальных сигналов в системах передачи с временным разделением каналов (ВРК) являются различные временные интервалы, которые занимают эти каналы, то есть линейный тракт предоставляется поочередно каждому из каналов на некоторый промежуток времени Δt_i. Принцип ВРК поясняется структурной схемой, приведенной на рис. 4.9 (показано одно направление передачи). Первичные информационные сигналы $C_i(t)$ поступают на электронные ключи КЭ$_i$, которые открываются последовательно импульсами длительностью τ, получаемыми от генераторного оборудования передающей станции (ГО пер). Последовательности импульсов $\psi_i(t)$, управляющие работой каждого электронного ключа, сдвинуты относительно друг друга на некоторый отрезок времени $\Delta\tau$, поэтому в какой-либо момент времени может быть открыт лишь один ключ. Синхронно и синфазно с электронными ключами передающей части работают электронные ключи прием-

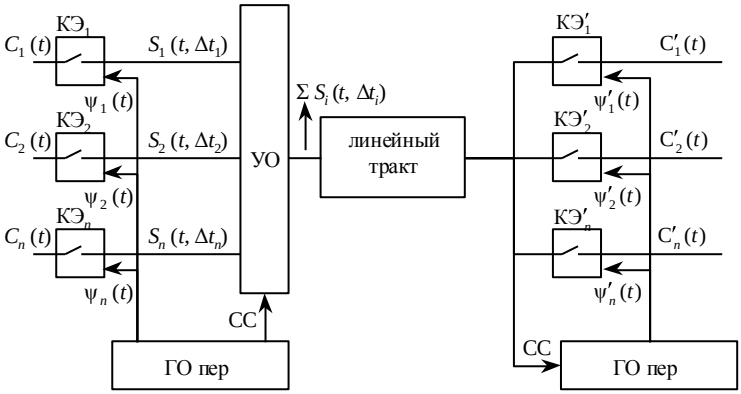

Рис. 4.9

ной части, которые управляются последовательностями импульсов $\psi_i'(t)$ от ГО пр, синхронизированного с ГО пер специальным синхросигналом СС.

Следовательно, в некоторый момент времени могут быть открыты электронные ключи, например, первого канала КЭ$_1$ и КЭ$'_1$, а остальные закрыты, поэтому будет путь для прохождения лишь сигнала $C_1(t)$ В следующий момент времени через интервал $\Delta\tau$ откроются ключи КЭ$_2$ и КЭ$'_2$ и пройдет сигнал второго канала $C_2(t)$ и т.д. Канальные сигналы после электронных ключей определяются как $S_i(t,\Delta t_i) = C_i(t)\psi_i(t)$, где $\psi_i(t)$ – функция переключения, принимающая значения 1 или 0 в различные, указанные выше, моменты времени. Поэтому амплитуда импульса равна напряжению сигнала $C_i(t)$ в момент отсчета (времени открытого ключа), что видно из рис. 4.10.

Из описанного выше следует, что в СП с ВРК первичные сигналы передаются периодическими кратковременными импульсами длительностью τ, а канальные сигналы представляют собой импульсную последовательность $S_i(t)$, модулированную по какому-либо параметру. В зависимости от первичного сигнала импульс может менять следующие свои параметры в моменты отсчета (открытия ключа): амплитуду, фазу (временное положение), длительность. В связи с этим различают амлитудно-импульсную модуляцию (АИМ), фазоимпульсную модуляцию (ФИМ) и широтно-импульсную модуляцию (ШИМ). Эти виды модуляции являются аналоговыми, так как модулируемый параметр может принимать любые значения в некоторых допустимых временных границах. Они находят применение в многоканальных радиосистемах с ВРК. В проводных МСП они не нашли применение из-за низкой помехозащищенности и потребностей в достаточно широком диапазоне частот в линейном тракте, что отрицательно сказывается на технико-экономических показателях систем передачи.

Значительно лучшими параметрами обладают цифровые методы модуляции, при которых каждый отсчет первичного информационного сигнала передается одним символом (0 или 1) или некоторой комбинацией двоичных сигналов (единиц и нулей). При этом каждый единичный импульс характеризуется постоянными (фиксированными) значениями амплитуды, длительности и фазы (временного положения). Такие “калиброванные” импульсы могут быть легко восстановлены при наличии значительных помех и искажений в линейном тракте. Этим и объясняется высокая помехозащищенность и другие достоинства цифровых методов передачи.

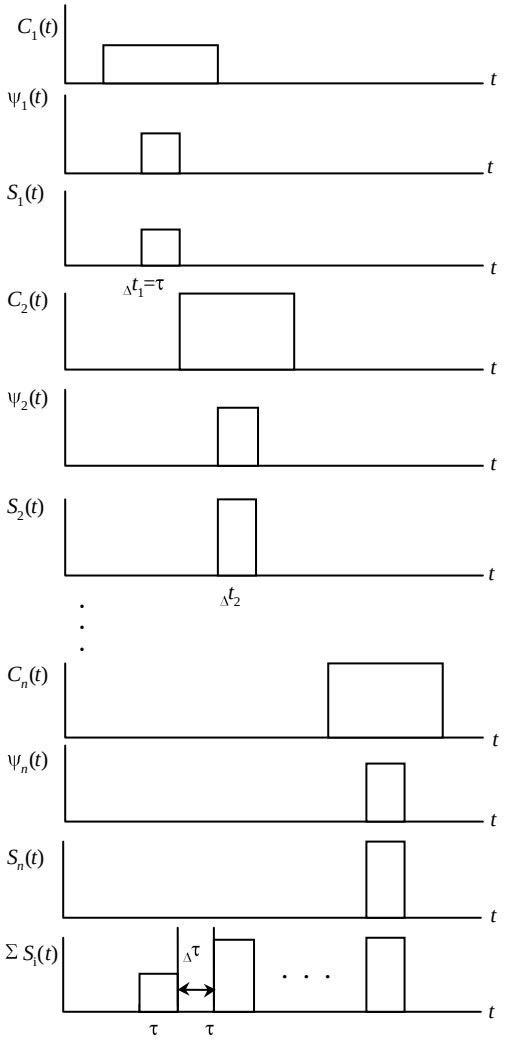

Рис. 4.10

Системы передачи, в которых в качестве канальных сигналов используются цифровые сигналы, получили название *цифровых систем передачи* (ЦСП). Из систем передачи с ВРК эти системы являются наиболее перспективными как для стационарных, так и для полевых сетей связи.

Как и аналоговая система передачи, цифровая система передачи состоит из аналогичных по назначению функциональных частей (рис. 4.11): каналообразующая аппаратура КОА, состоящая из аппаратуры временного группообразования АВГО и аппаратуры аналого-цифрового и обратного преобразования АЦП-ЦАП; аппаратура цифрового линейного тракта ЦЛТ; аппаратура сопряжения АС; генераторное оборудование ГО передачи и приема.

Аппаратура каналообразова-

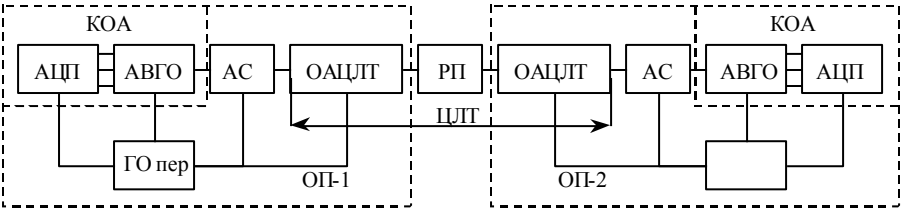

Рис. 4.11

ния предназначена для формирования типовых цифровых трактов на основе объединения в АВГО определенного числа входных цифровых сигналов в единый цифровой сигнал с определенной скоростью передачи и обратного разделения на приемной стороне. Аппаратура АЦП-ЦАП обеспечивает образование аналоговых каналов и трактов по соответствующим цифровым трактам.

Аппаратура цифрового линейного тракта обеспечивает необходимую дальность передачи многоканального цифрового сигнала с требуемой достоверностью. Линейный тракт включает оконечную аппаратуру цифрового линейного тракта ОАЦЛТ, линию передачи и аппаратуру промежуточных регенерационных пунктов РП. Для согласования сформированного в АВГО многоканального цифрового сигнала с линейным трактом предназначена аппаратура сопряжения АС, на выходе которой будет так называемый линейный цифровой сигнал, позволяющий наиболее эффективно использовать возможности линейного тракта.

Генераторное оборудование обеспечивает работу всех узлов ЦСП.

Более подробно аппаратура ЦСП рассматривается в отдельном учебнике.

4.6. Волоконно-оптические системы передачи

Построение волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) по структуре аналогичны АСП и ЦСП, но линейный тракт здесь строится на волоконно-оптическом кабеле. Поэтому для согласования с этим трактом группового (многоканального) аналогового или цифрового сигнала, сформированного в соответствующей каналообразующей аппаратуре, в аппаратуре сопряжения производится его преобразование в световой (оптический) сигнал.

Подробно теоретические и практические вопросы этих систем рассматриваются в учебнике “Оптические системы передачи”.

4.7. Асинхронно-адресные системы передачи

В отличие от систем передачи с ЧРК и ВРК в асинхронно-адресной или асинхронно-кодовой системе передачи (ААСП или АКСП) сигналы электросвязи всех каналов передаются в общей полосе частот и не синхронизированы ни по времени, ни по частоте. *СП называются асинхронными* потому, что по каждому каналу можно передавать информацию (первичные сигналы) между двумя

оконечными устройствами (терминалами), включенными в систему, в произвольное время, и сигналы оконечных устройств не синхронизированы. *СП называются адресными (кодовыми),* поскольку признаком, позволяющим разделять сигналы разных каналов электросвязи, является определенная кодовая комбинация символов, присваиваемая этому каналу и называемая его адресом. Приемные устройства ААСП построены таким образом, что каждое из них принимает сигналы, содержащие адрес этого канала. Такие системы, которые используют общий тракт для образования многих независимых каналов передачи информации, получили название систем со свободным доступом. Они используются в основном для телефонной радиосвязи в низовом звене с подвижными объектами, в спутниковых системах и др. Очевидно, что ААСП образуют каналы передачи импульсных (цифровых) сигналов. При этом речевые сигналы преобразуются при помощи одного из видов аналоговой импульсной модуляции (АИМ, ШИМ, ФИМ), либо дельта-модуляции, импульсно-кодовой модуляции.

После адресации кодовые группы ААСП не обладают строгой ортогональностью, поэтому называются квазиортогональными. Неполная ортогональность сигналов, применяемых в ААСП, приводит к появлению специфических для этих систем шумов неортогональности. Эти шумы возникают, когда случайное взаимное положение импульсов разных каналов в общем тракте образует комбинацию символов, соответствующую адресу данного канала, и в приемной части этого канала появляется сигнал-помеха. Шум неортогональности возникает также из-за искажений в тракте передачи и ошибочного приема отдельных символов адреса. Отсюда следует, что шумы неортогональности тем больше, чем больше число активно работающих каналов. Поэтому допустимый уровень шумов неортогональности определяет канальную емкость. Примером N-канальной ААСП может быть число радиостанций N радиосети, работающих на одной и той же радиоволне. Принцип асинхронно-адресного или асинхронно-кодового разделения будет широко использоваться в перспективных широкополосных сетях связи, образованных с помощью высокоскоростных каналов передачи (32 Мбит/с и выше) волоконно-оптических систем передачи. По таким сетям предполагается передавать так называемые транспортные контейнеры – большие пакеты сообщений с разной информацией, обозначенной адресами, обеспечивающими их разделение по конкретным приемникам информации. В этом случае для абонентов предоставляются виртуальные каналы. И их количество может быть сколь угодно большим.

4.8. Статистические системы передачи

Статистические системы передачи (ССП) используют традиционные принципы построения аналоговых и цифровых систем передачи, но в дополнение к ним в ССА канал ТЧ (при передаче телефонных сигналов электросвязи) предоставляется каждому абоненту только в те моменты времени, когда он говорит. На

время пауз абонент отключается от канала ТЧ, который предоставляется другому абоненту, ведущему в данный момент разговор. Таким образом, *ССП улучшают эффективность использования телефонных каналов электросвязи за счет учета статистики активности этих каналов.*

Исследования показали, что с учетом различных пауз при разговоре (слушание собеседника, паузы между словами, предложениями и т.д.) каждое из направлений канала ТЧ занято для передачи речевого сигнала (канал “активен”) только некоторое время $t_р$, которое существенно меньше общего времени $t_з$ занятия канала. Многочисленные эксперименты подтвердили, что в среднем коэффициент активности

$$K_а = t_р / t_з = 0{,}25...0{,}4, \qquad (4.6)$$

то есть каждое из направлений передачи занятого канала *свободно* от передачи информации в течение 60÷75 % времени (канал “пассивен”).

Вышеуказанный алгоритм обслуживания абонентов в ССП позволяет примерно в два раза повысить эффективность использования многоканальных трактов передачи за счет увеличения числа обслуживаемых абонентов.

Наиболее целесообразно использование ССП на цифровых трактах в цифровых каналах, представленных для телефонной связи, поскольку параметры цифровых линейных трактов не зависят от загрузки. В каналах передачи аналоговых систем применение ССП невозможно, так как это приведет к перегрузке групповых устройств, особенно усилителей, и соответствующему увеличению шумов в каналах (см. гл. 8). В статистических системах связи, как и в асинхронно-кодовых системах, вместо физического канала передачи абонентам для связи предоставляется виртуальный канал.